

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

# **Térinformatikai módszerek és technológiák a felszíni közúti közlekedésben**

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

BARSI ÁRPÁD

BUDAPEST

2019

„URAM, TANÍTS MEG UTADRA, VEZESS A HELYES ÖSVÉNYEN” (27. ZSOLTÁR)

# Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	iii
Rövidítésjegyzék .....	v
1 Bevezetés .....	7
1.1 Térinformatika: modellezés, rendszer, funkcionalitás .....	7
1.2 Célkitűzések, a dolgozat felépítése .....	9
2 Úthálózati elemek térképezése .....	11
2.1 Bevezetés .....	11
2.2 Útszakaszok és úthálózat térképezése.....	13
2.2.1 Útszakaszok detektálása mesterséges intelligenciával .....	13
2.2.2 Hálózati szemléletmód alkalmazása utak detektálása során.....	17
2.3 Közlekedési csomópontok térképezése.....	21
2.3.1 Csomóponti detektálás mesterséges neurális hálózati rendszerrel.....	21
2.3.2 Önszerveződő neurongráf .....	26
2.4 Következtetések, tézisek .....	33
3 Az útpálya jellemzőinek mérése és térképezése.....	35
3.1 Bevezetés .....	35
3.2 Az útpálya felületi jellemzőinek meghatározási módjai.....	37
3.2.1 Sztereofotogrammetriai mérési módszer burkolati jellemzők levezetésére.....	37
3.2.2 Monokamerás felmérőrendszer.....	46
3.2.3 Földi és mobil lézerszkennelés útburkolat felületi jellemzőinek meghatározására .....	49
3.3 Útpálya belső szerkezetének meghatározása számítógépes tomográfiával .....	54
3.4 Hidak lézerszkenneléses méréstechnikája .....	58
3.5 Következtetések, tézisek .....	59
4 Az úthálózat környezeti elemeinek térképezése .....	61
4.1 Bevezetés .....	61
4.2 Kétdimenziós környezeti modellek .....	66
4.3 Háromdimenziós környezeti modellek.....	71
4.4 Következtetések, tézisek .....	81
5 Közlekedő objektumok távérzékelése és térinformatikája.....	83
5.1 Bevezetés .....	83
5.2 Járműdetektálás és -modellezés.....	85
5.3 Módszertani fejlesztések járműmozgás vizsgálatára .....	93
5.4 Gyalogosok mérése.....	106

5.5	Következtetések, tézisek .....	113
6	Összefoglalás és kitekintés .....	115
7	Új tudományos eredmények .....	117
	Köszönetnyilvánítás .....	121
	Irodalomjegyzék .....	123



## Rövidítésjegyzék

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AI	Artificial Intelligence
AR	Augmented Reality
ASM	Active Shape Model
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
BEI	Burkolat Egyenetlenségi Index
BREP	Boundary Representation
CMVS	Clustering Views for Multi View Stereo
CT	Computed Tomography
CV	Computer Vision
CSG	Constructive Solid Geometry
DCM	Digital Contour Model
DDM	Digitális Domborzatmodell
DEM	Digital Elevation Model
DFM	Digitális Felületmodell
DGPS	Differential Global Positioning System
DHM	Digital Height Model
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOP	Dilution of Precision
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model / Digitális Terepmodell
EOV	Egységes Országos Vetület
FT	Fourier Transformation
GA	Genetic Algorithm
GIS	Geographic Information System
GIS-T	Geographic Information System for Transportation
GML	Geography Markup Language
GMM	Gaussian Mixture Model
GNG	Growing Neuron Gas
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
HD	High Definition
HO	Hand-Over
ICA	International Cartographic Association
ICP	Iterative Closest Point
IFT	Inverse Fourier Transformation
IMU	Inertial Measurement Unit
IRI	International Roughness Index
IRT	Inverse Radon Transformation
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LA	Location Area
LOD	Level of Details
MEMS	Micro Electromechanical System
MI	Mesterséges Intelligencia
MLS	Mobile Laser Scanning
MVS	Multi View Stereo
NCRST	National Consortium for Remote Sensing in Transportation
NDVI	Normalized Differential Vegetation Index
NIR	Near-Infrared
OSM	Open Street Map
RBF	Radial Basis Function

RFID	Radio Frequency Identification
RST	Road Surface Tester
RT	Radon Transformation
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine
SD	Small Definition
SFM	Structure from Motion
SOM	Self-Organizing Map
SRM	Stuttgarter Reibungsmesser
SRT	Skid Resistance Tester
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SVM	Support Vector Machine
TLS	Terrestrial Laser Scanning
VANET	Vehicle Ad-hoc Network
VR	Virtual Reality
VTD	Virtual Test Drive
WGS	World Geodetic System
WSN	Wireless Sensor Network

# 1 Bevezetés

2016-ban a *Geographic Information System for Transportation* (GIS-T), magyarul Közlekedési Térinformatika nevű szervezet az Amerikai Egyesült Államok minden tagállam közlekedési minisztériumában (*Department of Transportation*) egy felmérést készített. A válaszok szerint ezen intézmények 71 %-ában szakképzett térinformatikus (*Certified GIS Professional*) dolgozik, sőt 67 %-nál már önálló GIS csoport is létezik. Ezek a csoportok átlagosan 24.9 főből állnak, közülük 9.8 főállású. A térinformatika főként a tervezésben (67 %) és az információs szolgáltatásban (52 %) van jelen, de a válaszok szerint a hatékonyságban és a költségmegtakarításban is rendkívül fontos. A térinformatikán belül a válaszadók 19.2 %-ban a helymeghatározást, 14.8 %-ban a technológiát és 14.4 %-ban út alaptérképek készítését említették. A GIS csoportok éves költségvetése a legtöbb esetben 100 és 250 ezer dollár, de akad olyan állam is, ahol ilyen célra legalább évi 2.5 millió dollár jut. A rendelkezésre álló pénz 39 %-át szolgáltatásra, 28 %-át és 14 %-át szoftverre és hardverre, valamint 14 %-át adatokra fordítják (GIS-T, 2016).

A piackutatások szerint a globális navigációs rendszerek piaca 2016-ban 583 millió dollárt tesz ki, éves növekedési üteme 9.98 %, aminek köszönhetően 2021 végére 938 millió dollárt érhet el (MordorIntelligence, 2017).

Látható, hogy a térinformatika és annak részterületei nem idegenek a közlekedéstől és a közlekedési szakemberektől. Erősen szolgáltatás-orientált, a közlekedés célkitűzéseinek alárendelt tudományág.

## 1.1 Térinformatika: modellezés, rendszer, funkcionalitás

A térinformatika a tér tudománya, amelynek két jelentősebb pillére van. Az első a földtudományokra támaszkodó, mivel a tér leírásához az ott kialakult mérési, helymeghatározási és ábrázolási módszerek elengedhetetlenek. Ezek az említett módozatok a mára önállóvá vált geodéziához, navigációhoz, csillagászatához, földrajzhoz, kartográfiához kötődnek, de további tudományterületek is említethetők. A másik pillér a számítógépek fejlődésével függ össze, tehát az informatika megjelenése és folyamatosan növekvő jelenléte. Az informatika olyan témákban figyelhető meg a térinformatikában, mint az adatbázis-kezelés, a számítógépes grafika, a modern mérési és adattovábbítási megoldások, a számítási eljárások.

A térinformatikát rendszerszintű megközelítése során az információs rendszereknél általánosan érvényes négy nagyobb egységre lehet bontani:

- adatgyűjtés (input),
- adattárolás (management),
- elemzés (analízis),
- megjelenítés (vizualizáció).

A közreműködő személyek a fenti csoportokhoz úgy kapcsolhatók, hogy az első két kategória művelői az ún. készítőik, akik létrehozzák a térinformatikai rendszereket, majd azokat adatokkal töltik fel. Az analízis szakemberei az elemzők, végül a megjelenítés közreműködő köre jellemzően az alkalmazásfejlesztők és a felhasználók. Ha a Google térképeire gondolunk, ez utóbbi csoport teszi ki a rendszer felhasználóinak legnagyobb részét. Jóval kevesebben vannak, akik a téradatokra támaszkodva elemzéseket hajtanak végre, s a rendszer kialakítói, a fejlesztők vannak a legkevesebben. Ez annak ellenére is igaz, hogy napjainkban az önkéntes vagy közösségi alapon történő térképezés, – mint például az OpenStreetMap – egyre növekvő tendenciát mutat.

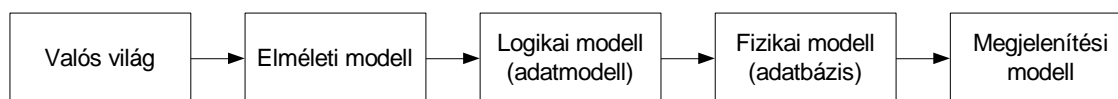
A Föld ábrázolásával elkezdődött a térképek készítése és használata. A múlt évezredig a térképekre a Detrekői-Szabó féle definíciót lehet adni: „*A Föld egyes részeinek felszínét, valamint a felszínen vagy alatta lévő természetes és mesterséges tereptárgyakat arányosan kicsinyítve, megadott vetítési szabályok szerint általában sík felületen ábrázoló rajz vagy fénykép.*” (Detrekői & Szabó, 2013) Ennek a meghatározásnak az üzenete egyben az is, hogy a hagyományos (ma analóg) térképek a tér adatainak tárolására és megjelenésére egyszerre voltak hivatottak.

A kor szokásos paradigmaváltása a legjobban a Nemzetközi Kartográfiai Szövetség (*International Cartographic Association – ICA*) meghatározásában látszik: „*A térkép a földrajzi valóság szimbolikus reprezentációja, amely a létrehozók kreatív megfontolásán alapuló objektumokra és jelenségekre vonatkozik olyan felhasználási céllal, amelyben a térbeli kapcsolatoknak elsődleges jelentősége van.*” (Detrekői & Szabó, 2013) Ez a szimbolikus reprezentáció tehát kiterjeszti a térkép fogalmát, a modern felfogás szerint a térről digitálisan adatbázist készítünk, amely az adatok tárolási céljából jön létre. A tárolástól elválasztott, de éppen emiatt nagyobb lehetőségeket magukba foglaló megoldással történhet meg az adatok megjelenítése, azaz a tér ábrázolása. Az adatok között az egyre inkább dinamikus kapcsolatok, összefüggések egyre nagyobb szerepet töltenek be.

A földrajzi valóság objektumainak és jelenségeinek azon információi, amelyek a földfelszín valamely helyéhez kötöttek, jelentik a térbeli vagyis a geoinformációkat (Maguire, 1991). A szakirodalomban az ezeket kezelő rendszereket geoinformációs rendszereknek nevezik, ismert angol megnevezéssel *Geographic Information System*-nek, röviden GIS-nek.

Annak érdekében, hogy a valóság objektumait, jelenségeit számítógépes környezetbe lehessen bevinni, azok modelljeinek megalkotására van szükség. (Bakos & Fábán, 1989) szerint: „*A modell a vizsgált rendszer vagy folyamat belső összefüggéseit, legjellemzőbb sajátosságait, rendszerint matematikai egzakttsággal képletekbe sűrítő formula*”, illetve „*azon céllal létrehozott konstrukció, hogy rajta a valóság bizonyos jelenségeit jobban tanulmányozhassuk.*” A két alapvető lépés a modellalkotás és a modell alkalmazása (szimuláció).

A térinformatika eszközeinek használatához ezért a valóságról előbb elméleti, majd adat- és adatbázismodellt, végül megjelenítési modellt kell létrehozni (1.1. ábra).



1.1. ábra: A földfelszín modellezésében használt részmodellek

Bernhardsen és Detrekői a teljes folyamatot részleteiben is leírja; az elméleti modell már csak a cél eléréséhez szükséges jellemzőket tartalmazza (kiválasztással), majd az adatmodell a logikai összefüggéseket, az adatbázismodell pedig annak fizikai, számítógéppel kezelhető módon történő ábrázolását jelenti. A megjelenítéshez a tárolt adatbázisból történik a megjelenítési modell, például a kartográfiai modell meghívása (Bernhardsen, 1992; Detrekői & Szabó, 2002).

Funkcionalitását tekintve a térinformatikai rendszerekben megfigyelhető adatgyűjtési módok kétfélek lehetnek. Vonakozhatnak a valóság elméleti modelljében kiválasztott elemi ún. entitások adatmodellben megfelelő objektumainak egyrészt geometriai, másrészt szakadat, más néven attribútum tulajdonságaira. A diszkrét pontokban megfigyelhető adatok mellett nemritkán felületeken elhelyezkedő adatokat is kezelni kell. A geometria klasszikus térinformatikai felosztása szerint vektoros, raszteres vagy hibrid lehet. Szorosan a geometriához kapcsolódik a topológia, aminek a közlekedés világában kiemelkedő fontossága van. Az időtartományban tanulmányozva adataink lehetnek statikusak, dinamikusak vagy féldinamikusak. Adatminőségi szempontból elsődlegesen (közvetlenül) és másodlagosan (közvetetten) gyűjtött adatok tehetik ki az adatbázisok tartalmát. Az adatgyűjtő eljárások ezen szempontok mindegyike szerint jellemezhető, amellett, hogy történhetnek a gyűjtési hely szerint a felszínen, az alatt, vízben vagy a levegőben. Utóbbi a távérzékelés révén a világűrre terjed.

A leglényegesebb geometriai adatgyűjtő eljárások a következők:

- földi geodéziai módszerek (pl. tachimetria),
- műholdas mérés technika (pl. GPS),
- földi fotogrammetria (pl. forgalomfigyelő kamerákkal történő adatgyűjtés),
- földi lézerszkennelés (pl. 3D lézerszkennerek alkalmazása terek felmérésekor),
- mobil térképezés (pl. kamerás és lézerszkenneres felmérő járművek használata úthálózati felmérésben),
- légi fotogrammetria (pl. légifényképező repülés és ortofotó-készítés),
- légi lézerszkennelés (pl. úthálózat mentén végzett szkennelő repülés),
- radar-távérzékelés (repülőgépes vagy műholdas platformról),
- műholdas optikai távérzékelés.

Az adattárolás funkciói között az adatállományok import és export eljárásait szokás érteni. Némely esetben a szenzorfüzión bizonyos lépései és az adatbázisok menedzselési műveletei is ebben a kategóriában szerepelnek.

Az elemzés jelenti a térinformatika igazi értéknövelő képességeit. A kiszolgálni kívánt felhasználók szerint itt a földügyi, energiaellátási, katasztrófavédelmi, várostervezési, erőforráskutatási, közlekedési, infrastruktúra kezelési, távközlési, valamint a környezetvédelmi csoportok a legjelentősebbek (Detrekői & Szabó, 2013). Az elemzés hatását tekintve operatív, döntés-előkészítő vagy stratégiai szinten valósul meg.

Az elemzési eljárások főbb csoportjai

- a statisztikai műveletek (pl. bekövetkező gyalogosbalesetek évi átlagos száma),
- a lekérdezések bármely objektumjellemzőre vonatkozóan (pl. legnagyobb forgalmú útszakasz kiválasztása),
- a geometriai számítások, megszámlálások, mérések (pl. települések légvonalbeli távolsága),
- a vektoradat-műveletek (pl. pufferező zóna-műveletek, felületmetszések),
- a raszteradat-műveletek (pl. szűrések, szomszédsági elemzések),
- a magassági elemzések (pl. összelátás vizsgálat),
- a hálózati elemzések (pl. legrövidebb útvonal kiválasztása),
- a modellezés és szimuláció (pl. közúti közlekedés zajának terjedése),
- az adatbányászat (Detrekői & Szabó, 2013).

A megjelenítés alapvetően az elérhető hardver-eszközök függvénye. Ennek megfelelően papír, számítógépes monitor, vetítő, hordozható eszközök (pl. tablet, mobiltelefon) jöhet szóba. A régóta bevált kétdimenziós ábrázolás mellett az igazi 3D-s vizualizáció is teret nyert; mind a kiterjesztett (*augmented reality* – AR), mind a virtuális valóság (*virtual reality* – VR) eszközeinek használatával.

## 1.2 Célkitűzések, a dolgozat felépítése

A PhD-fokozat megszerzése óta eltelt két évtizedben figyelmem erőteljesen a közlekedés, azon belül a felszínen zajló közúti közlekedés felé fordult. Már egyetemi térinformatikai tanulmányaim során találkoztam a közlekedés említésével, az azóta bekövetkezett technikai/technológiai fejlődés egyre érdekesebbé változtatta ennek a két területnek a képét és sejtette lehetséges összekapcsolódását. Módom nyílt olyan kutatási munkákban dolgoznom, amelyek arról (is) szóltak, hogy vizsgálható volt ennek az együttműködésnek egyáltalán

lehetséges volta, minősége. Ezen tevékenységek közben aztán kikristályosodott, hogy a térinformatika és a közlekedés szerves kapcsolata már létezik, az eszközöket, módszereket hihetetlen izgalmas vizsgálni és fejleszteni.

A fentiek belátása után a következő tématerületeket ismertem fel, ahol személyes érdeklődésem ennek a két területnek a kooperációjában megjelenhet és kutatási erőfeszítéseket érdemes tenni:

- térinformatikai elemzési eszközök, közöttük alapvetően a gráfok alkalmazása,
- egyképes és sztereofotogrammetriai valamint űrtávérzékelési módszerek kutatása, kép alapú adaternyerési és feldolgozási eljárások közlekedési célú felhasználása,
- digitális képfeldolgozás technikájának intenzív bevetése a műholdas és földi platformokon nyert kamerafelvételek kiértékelésében,
- légi, földi és mobil lézerszkennelésben rejlő közlekedési lehetőségek felderítése és fejlesztések elvégzése,
- járműnavigációs és járműfedélzeti mérési eszközök, alkalmazások fejlesztése,
- a mesterséges intelligencia módszereinek alkalmazása a távérzékelés, a térinformatika és a közlekedési adatok elemzésében.

Értekezésem felépítésénél két lényeges vezérfonalat követtem. Az első alapötlete egy amerikai kutatási konzorciumtól, az NCRST-től származik (részletes ismertetése a 4.1. fejezetben olvasható). Felfogásuk szerint a távérzékelésnek a közlekedésben az infrastruktúra, a környezet, a forgalom és a vészhelyzetek területén lehet alkalmazást találni. Ezt az elvet követtem ezért a disszertáció főbb fejezeteinek kialakításában. A bevezetést követő második fejezet ezért az úthálózati elemek térképezésével, a harmadik az útpálya jellemzőinek mérésével és térképezésével foglalkozik. A negyedik fejezet az úthálózat mentén található környezet eleminek térképezéséről, az ötödik fejezet pedig a közlekedő objektumok érzékeléséről és térinformatikai elemzéséről szól. Az egyes fejezetekben igyekeztem a térinformatikai „alapnégyes”, azaz az adatgyűjtés, tárolás, elemzés és megjelenítés szempontjait érvényesíteni. A munkát egy összefoglaló és kitekintő fejezettel zárom, majd külön fejezetben összesítem az új tudományos eredményeket jelentő téziseket azok altéziseinek megfogalmazásával együtt. Az olvasás megkönnyítéséhez a szöveg elé egy rövidítésjegyzéket állítottam össze. A felhasznált irodalmi források listája zárja munkámat.

## 2 Úthálózati elemek térképezése

### 2.1 Bevezetés

Magyarország országos közúthálózatának teljes hossza 2018-ben 32 006 km, amiből 8 917 km a főhálózat, melyből 2 335 km az európai úthálózatnak is része. A gyorsforgalmi úthálózat (autópályák, autóutak) hossza 1 474 km, míg a helyi közutak hossza 174 578 km (Magyar Közút, 2018). Timár és Rozgonyi szerint a magyar úthálózat 2005-ben a nemzeti vagyonban 12 000 milliárd forintot tett ki (Timár & Rozgonyi, 2007), tehát rendkívüli jelentősége van az ország szempontjából.

Topológiai megközelítéssel az úthálózat két fő alapelem sokaságából áll: az útszakaszok (útszegmensek) és az azok kapcsolódásakor létrehozott csomópontok (útkereszteződések). Ennek a két alapelemnek az úthálózat leggyakoribb reprezentációjában, a gráfokban az élek és a csomópontok felelnek meg.

A térinformatikai módszerekkel végzett térképezési folyamatok gyakran a távérzékelésre, mint adatnyerésre támaszkodnak elsődlegesen. A távérzékeléshez sorolható a műholdak, repülőgépek, drónok, helikopterek fedélzetén üzemeltetett kamerák és szkennerek segítségével nyert adatok – elsősorban képek – előállítása. Ezeken a felvételeken az egyik leggyakoribb, egyben legnehezebb feladat a szükséges geometriai elemek azonosítása, detektálása.

(Steger *et al.*, 1995) szerint az utak képekből történő kinyerése jelentős erőfeszítéseket igényel. Alapvetően kétféle stratégiát lehet megkülönböztetni: az első kategória a kezdetben manuális, később félautomatikus megoldásoké, a második pedig a teljesen automatikus módszereké. Az első csoport megoldása során egy (emberi) operátornak az út bizonyos pontjait meg kellett jelölnie, majd ezek a pontok a további kinyerési műveleteknek az alapját képezték. A csoport jelentősebb képviselői (McKeown *et al.*, 1988; Gruen & Li, 1994; Heipke *et al.*, 1994) voltak. A teljesen automatikus csoporthoz tartozó (Barzohar & Cooper, 1993; Zerubia & Merlet, 1993; Ruskone, Airault & Jamet, 1994) modellt feltételező automatikus megoldást fejlesztettek.

(Garnesson, Giraudon & Montesinos, 1990) szerint az utak detektálásához 5 csoportban kell a jellegzetességeket meghatározni, majd azok alapján a képtartalmat osztályozni. Ezek a jellegzetességek néhány példával illusztrálva a következők:

- **geometriai:** az utak elnyúlt, hosszúkas objektumok, görbületük többnyire maximált;
- **radiometriai:** az útfelületek általában homogén intenzitásértékűek, a környezetükhöz képest kontrasztosak;
- **topológiai:** az utak keresztezik egymást, hálózatot alkotnak és ok nélkül nem vagy csak ritkán érnek véget;
- **funkcionális:** az utak városokat, helyeket kötnek össze;
- **kontextusra vonatkozó:** a magasabban épített utak (tipikusan a felüljárók) árnyékot vetnek. A fák eltakarják az útfelületet, ugyanakkor a fasorok utakat jeleznek.

A különböző űr- és légifényképek eltérő geometriai, radiometriai és spektrális jellemzővel bírnak, ennek megfelelően a kinyerni kívánt útobjektumok részletessége, pontossága, sőt a rájuk irányuló módszertani fejlesztés is rendkívül sokféle lehet. A különböző méretarányok kezelésére kedveltek a wavelet alapú pl. (Gruen & Li, 1994) és a skálater (scale space) alapú pl. (Mayer, 1998) megoldások.

Mayer értekezésében a következő útfelismerési megoldás-csoportokról beszél (Mayer, 1998):

- az utakat, mint egyeneseket éldetektáló eljárások ún. extraktorok segítségével lehet előállítani;
- az elemi utak egybeszerkeszthetők (*grouping*); hálózat képezhető a különféle klaszterező, a szomszédos és kollineáris egyeneseket egybefűző eljárásokkal;
- az utak követhetők olyan eljárásokkal, amelyek világos-sötét vagy sötét-világos átmenetekre alapozva azok középvonalát érzékelik;
- az utak leírhatók a széleiket jelentő vonalak követésével; itt a legjelentősebb megoldások egyike a snake-eken alapuló eljárások.

A képfeldolgozó eljárások jelentős bővítését a mesterséges intelligencia (MI vagy *artificial intelligence* – AI) bevonása jelenti. (Trinder *et al.*, 1997) cikkükben elemi példákat mutatnak be az útdetektálás során a logikai láncolásra Prolog nyelven. Térinformatikai adatbázis felhasználásával szintén hatékonyan támogatható a megoldás, (Baumgartner *et al.*, 1996). (Heipke *et al.*, 1994) éldetektálásra alapozott váz-képzéssel, majd vektorizálással jutnak félautomatikus módszerrel az utakhoz. (Steger, 1998) eljárása az utak tengelyeinek kimutatására szolgál, később a már említett Baumgartner és Wiedemann (Wiedemann & Ebner, 2000) is hasonló elvet követve fejlesztenek technológiát. Utóbbi kifejezetten hálózati elvek szemmel tartásával dolgozza ki megoldását. (Vosselman & de Knecht, 1995) az utak követésére Kálmán-szűrést használnak, (Geman & Jedynak, 1996) maximum-a-posteriori (MAP) becslést, míg (Barzohar & Cooper, 1993) másodrendű Markov-folyamatokat. (Ruskone, Airault & Jamet, 1994) keresési fa alkalmazásával detektálnak utakat, (Gruen & Li, 1994) pedig dinamikus programozást alkalmaznak a snake-ekhez nagyon közeli útmodellen. A burkolati jelek és zebrák felfestésének detektálásán keresztül mutat be lehetséges felismerést (Zhang, Baltsavias & Gruen, 2001). A lakott területeken belüli útdetektálás kapcsán (Hinz, Baumgartner, *et al.*, 2001) hierarchikus szemantikus hálózat formájában megadott egy lehetséges útmodellt. Butenuth a snake-technológiát fejlesztette tovább és hálózatnak kialakítva végzett többek között útdetektálást (Butenuth, 2008).

Az utak képi felismerésére a mesterséges intelligencia eszközeinek használata kézenfekvő. Legérthetőbb magyarázatként az hozható fel, hogy a számítógépes környezetben megvalósuló mesterséges intelligencia a természetes emberi intelligencia utánzásával, majd annak továbbfejlesztésével jött létre. (Russell & Norvig, 2005) szerint a mesterséges intelligencia érzékelés, gondolkodás és cselekvés gépi megvalósítása. Könyvükben megadják azt a négyes csoportosítást, ami szerint szokás az MI fejezeteit tárgyalni (2.1. táblázat).

2.1. táblázat: A mesterséges intelligencia négy legfontosabb kutatási területe

	Emberi (emberszerű)	Racionális (ésszerű)
Gondolkodás	① Emberi módra gondolkozó rendszer, pl. kognitív modellezők	② Racionálisan gondolkozó rendszer, pl. a „gondolatok törvényeinek” leírása
Viselkedés	③ Emberi módra cselekvő rendszer, pl. természetes nyelvfeldolgozás, automatikus következtetés, gépi tanulás, robotika	④ Racionálisan cselekvő rendszer, pl. racionális ágensek

A 2.1. táblázat emberi viselkedéssel foglalkozó ③ mezője a legbővebb; ide tartoznak a tudásreprezentációs eljárások és a gépi látás (*computer/machine vision*) megoldásai is. Ezekről belátható, hogy a képi tartalom kinyerésében, objektumok, mint például utak esetében használhatók, használandók. A gépi tanulás is tekinthető egyfajta tudáskifejezésnek, hiszen például az ide sorolt neurális hálózatok kialakításukkor bemenet-kimenet vektorterek közötti kapcsolatokat, asszociációkat írnak le. Ezzel a szemlélettel a bemenet-kimenet leképezés felfogható úgy, mint képtartalom (vektora) és terepi útobjektum (vektora) közötti függvénykapcsolat kialakítása – a legjobb paraméterezés biztosításával, mint optimumszámítási eredmény elérésével.



A mesterséges intelligencia fejlődése talán ebben a csoportban látható a legjobban: a ma már klasszikusnak tartott if-then szabályrendszerrel kiindulva a gépi tanuláson (*machine learning*) át jutott el a mélytanulás (*deep learning*) modern fázisáig.

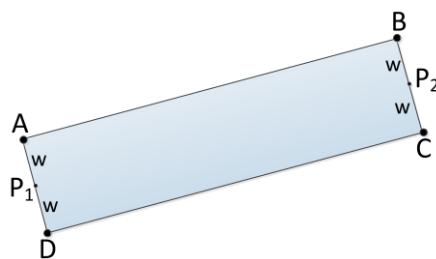
A genetikai algoritmusok olyan ágensekhez sorolható MI-eszközök, amelyek kialakítási alapötletüket a természetes evolúcióból merítették, azaz egy populációban található egyedek folyamatosan utódok kialakításán keresztül sajátosságaikat továbbadják; mutáció és keresztezés révén pedig változásokat és kombinációkat valósítanak meg. Ennek számítógépes megoldása a számításgényes eljárás miatt nagyon bonyolult, sokdimenziós optimumszámítás.

## 2.2 Útszakaszok és úthálózat térképezése

### 2.2.1 Útszakaszok detektálása mesterséges intelligenciával

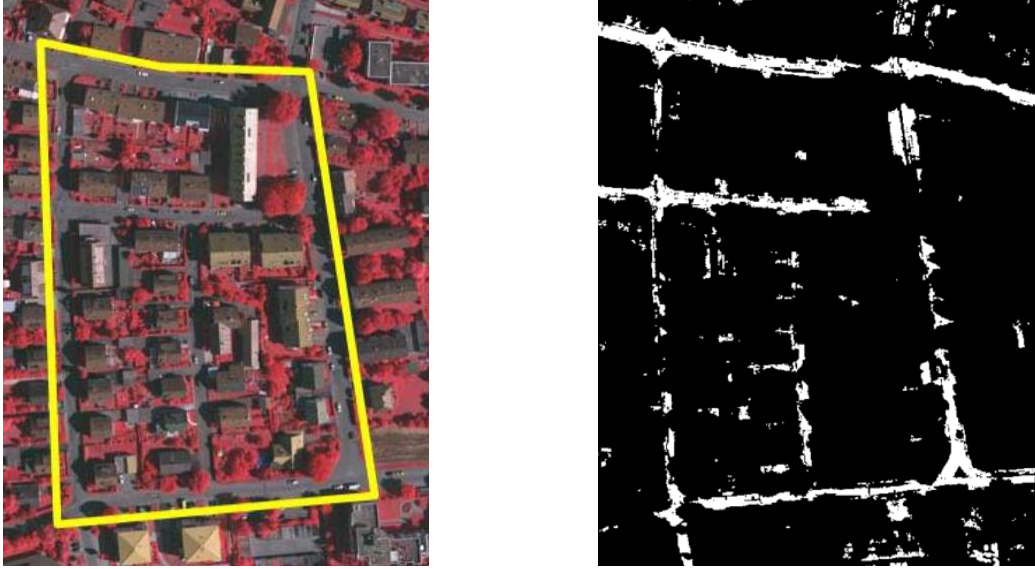
A távérzékelésben megtanultak szerint az utak felismerése nem pusztán az azokhoz tartozó pixelek színe, hanem a pixelek elrendeződésének figyelembe vételével oldható meg. A pixelszínek kezelésére a mesterséges neurális hálózatok jó megoldást adnak; ezzel a területtel foglalkoztam PhD értekezésemben is. Az alak esetében azonban rengeteg ötlet szöbe jöhet. Geodéziai feladatokban előforduló pontillesztésekre (Laky, 2012) ad egy érdekes megoldást genetikai algoritmusokkal, így eredményesnek látszott a neurális és genetikai eljárások kombinációja térinformatikai képelemzési feladatban is.

Munkám során az út egy szakaszát olyan téglalappal modelleztem, amely két rövid oldalának felezőponti  $x$  és  $y$  koordinátaival, valamint  $w$  félszélességgel írható le. Ennek a szakasznak így 5 paraméteren keresztül egyértelműen megadhatók a méretei – azonosan hosszúság dimenzióban. Ez az adatvektor csak lineáris elemeket tartalmaz, szemben a lehetséges egy sarokpont két koordinátáit, két oldalhosszt és egy elfordulási szöveget tartalmazó jellemzővektorral, ahol a forgatás miatt trigonometriai műveletekre van szükség a kapcsolódó lépésekben, továbbá a vektor elemeinek dimenziója nem azonos típusú (szög és hosszegység egyaránt előfordul).



2.1. ábra: Útszakaszt modellező téglalap. Az ABCD sarokpontok koordinátái helyett  $P_1$  és  $P_2$  kulcsponthoz tartozó  $x$  és  $y$  koordináták és  $w$  félszélesség megadása geometriai értelemben ekvivalens leírást biztosít

A képi alapot adó hamisszínes infravörös légifelvétel 8 cm-es terepi geometriai, 11 bites radiometriai felbontással készült 900 m magasságból. A Nemzetközi Fotogrammetriai és Távérzékelési Társaság (ISPRS) a Stuttgart közeli Vaihingenről Intergraph DMC nagyformátumú digitális légifényképező kamerával készített  $3145 \times 2436$  pixel méretű tesztképe szolgált a vizsgálat alapjául.



2.2. ábra: Az ISPRS Vaihingen-teszterülete eredeti képként és annak neurális osztályozóval végzett binarizációja

A kép bináris (út és nem-út) szegmentálását *Support Vector Machine* (SVM) típusú neurális hálózattal végeztem. A tapasztalatok szerint a képek intenzitássterének változatossága miatt a lineáris helyett a Gauss-féle (radiális bázisú – RBF) kernelfüggvényt vettem igénybe:

$$G(\mathbf{s}, \mathbf{x}) = \exp\left(-\|\mathbf{s} - \mathbf{x}\|^2\right) \quad (1)$$

ahol  $\mathbf{s}$  az ún. support vektor,  $\mathbf{x}$  a pixel intenzitásvektora. A kernellel azután a neurális hálózat döntése az alábbiak szerint történik:

$$c = \sum_i \alpha_i G(\mathbf{s}_i, \mathbf{x}) + b \quad (2)$$

ahol a  $c$  a bináris osztályhoz sorolás értéke (0 vagy 1),  $\alpha$  és  $b$  súly, illetve torzításértékek.

A tanításhoz 4-4 mintaterületet jelöltem ki, összesen a képtartalom 0.02 %-ára kiterjedően. Mivel a felvétel elemzése során kiderült, hogy a színcsatornák erősen függnek egymástól, a távérzékelésben követett gyakorlatot vettem át az előfeldolgozáshoz: további csatornának betettem a légifényképek normalizált differenciált vegetációs indexének (NDVI) sávját, amelyet a következők szerint számítottam:

$$NDVI = \frac{R}{R + G + B} \quad (3)$$

ahol  $R$ ,  $G$  és  $B$  a légifénykép pixeljeinek intenzitásértékei a vörös, zöld és kék csatornákon.

Az így négydimenziósra bővített képet főkomponens-transzformációval dekorreláltam (Duda, Hart & Stork, 2001) és két levezetett sávra redukáltam. Az előfeldolgozást az SVM neurális hálózattal 91.97 % teljes pontossággal tudtam elvégezni (2.2. táblázat) (Barsi, 2012a).

2.2. táblázat: SVM binarizáló osztályozás in-sample pontossága. OE – Omission error, PA – Producers' accuracy (Készítői pontosság), CE – Commission error, UA – Users' accuracy (Felhasználói pontosság), OA – Overall accuracy (Teljes pontosság), AA – Average accuracy (Átlagos pontosság)

		Osztályozott				
		Út	Nem-út	$\Sigma$	OE	PA
Teszt	Út	1146	0	1146	0.00%	100.00%
	Nem-út	142	481	623	22.79%	77.21%
	$\Sigma$	1288	481	1769		
	CE	11.02%	0.00%		91.97%	88.60%
	UA	88.98%	100.00%		OA	AA

A kapott bináris képen (2.2. ábra) nem végeztem morfológiai műveleteket, hogy a kapcsolódó genetikus algoritmus (GA) viselkedése, különösen zajérzékenysége tanulmányozható legyen. A genetikus algoritmus vezérlő eljárásának a differenciális evolúciót választottam, amely a „klasszikus” genetikus technikákhoz képest gyorsabb lefutást eredményez (Storn & Price, 1997).

A metaheurisztikus keresések csoportjába tartozó differenciális evolúcióban is  $n$ -dimenziós adatvektorok (tulajdonságvektorok) reprezentálják a géneket. A  $G$  generációhoz tartozó  $i$ . gén  $\mathbf{x}_{i,G}$ . Az evolúciós algoritmusok három alpművelete a másolás, a mutáció és a keresztezés. A másolás egyértelmű többszörözést jelent; ezt nem részletezem. A mutációhoz a differenciális megoldás három gént igényel, ezek rendre  $\mathbf{x}_{i,G}$ ,  $\mathbf{x}_{j,G}$  és  $\mathbf{x}_{k,G}$ . Az  $MF$  mutációs faktor szabályozása mellett  $\mathbf{v}$  mutáns (módosult) gén a következők szerint számítható:

$$\mathbf{v}_{i,G+1} = \mathbf{x}_{i,G} + MF(\mathbf{x}_{j,G} + \mathbf{x}_{k,G}) \quad (4)$$

A keresztezéshez két génre van szükség, amelyek között a  $CF$  keresztezési faktor szabályozó hatása mellett számítjuk az  $\mathbf{u}$  utód-gént:

$$\mathbf{u}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_{i,G} & \text{ha } q \leq CF \\ \mathbf{x}_{j,G} & \text{egyébként} \end{cases} \quad (5)$$

ahol  $q$  véletlen azonosító.

A differenciális evolúció módszusa (Laky, 2012) alapján a következőképp adható meg pszeudokóddal:

```

(1)      Initialize population (Kezdeti populáció létrehozása)
(2)      for i = 1 to max_epochs
(3)          for j = 1 to max_genes
(4)              Véletlen kiválasztással 3 különböző gén kiválasztása
(5)              Mutation (Mutáció)
(6)              Crossover (Keresztezés)
(7)              Copy (Másolás)
(8)              Fitness számítás
(9)          endfor
(10)     endfor

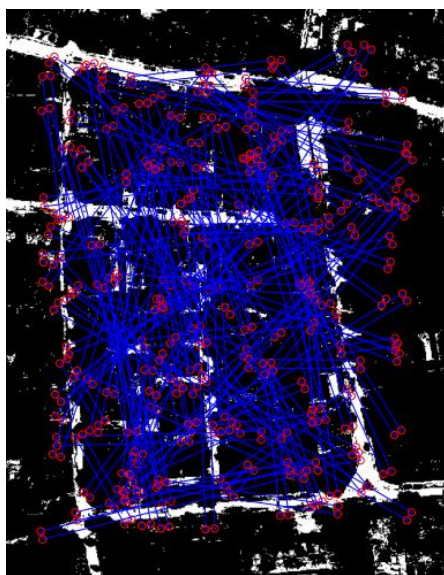
```

A kezdeti populáció 200 egyedet (azaz útszegmenst jelentő téglalapot) tartalmazott (2.3. a ábra). A szükséges fitness-függvény a következő volt:

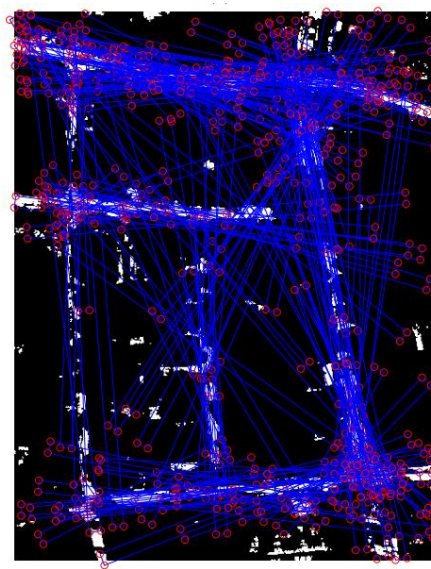
$$fitness = \left[ 1 - \frac{N_{út}}{N_{maszk}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{\log N_{maszk}} \right] \quad (6)$$

ahol az út és téglalap által lemaszkolt pixelek darabszáma  $N_{út}$ , illetve  $N_{maszk}$ . Minden generáció számításának befejezésekor az összes génre le kell vezetni azok fitness-értékét.

200 generáció után megengedett mutációval kaptam az eredményt (2.3. b ábra). Az önhasonlóság elkerülésére a vizsgálatban az egyedek variációját folyamatosan figyeltem és a növekedésre utaló inflexiós lépésszám átlépésekor leállítottam az evolúciót (2.4. ábra).

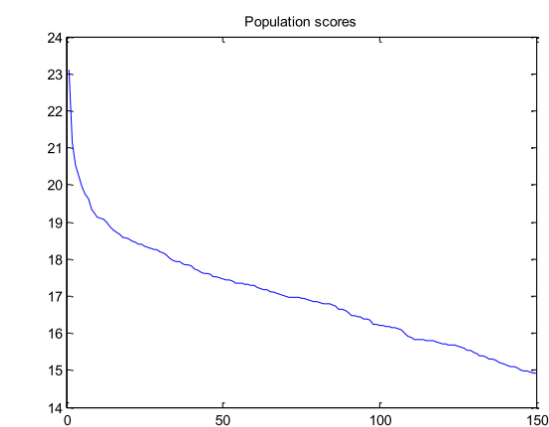


a) kezdeti populáció eloszlása

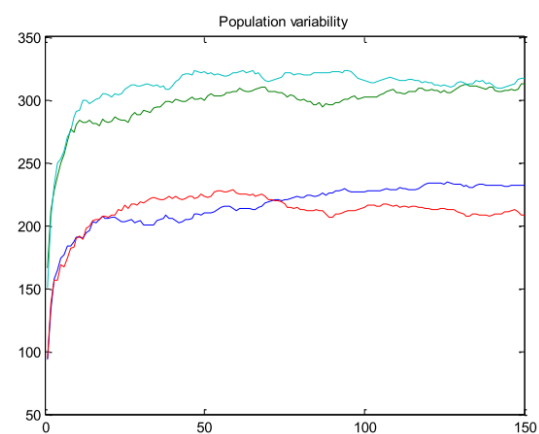


b) végső populáció eloszlása

2.3. ábra: A genetikus algoritmus futtatásával megtalált útszakaszok



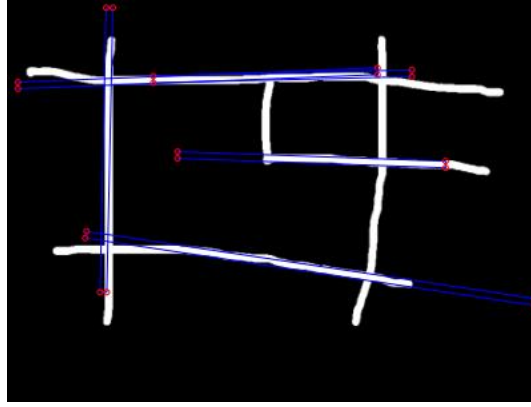
a) a populáció fitness értékének alakulása az evolúció során



c) a populáció variancia diagramja a két legjobb és legrosszabb génkép között

2.4. ábra: Az evolúció folyamatának monitorárai

A zajok hatására nem csupán a vízszintes és függőleges orientációjú utak lettek kiválasztva, hanem átlós egyedek is „életben maradtak”. A zajszűrés fontosságára a 2.5. ábrán szintetikus kép azonos értékelése mutat rá, mivel az eljárás az idealizált ábrán hibátlanul rátalál az útszegmensekre (Barsi, 2012b).



2.5. ábra: Zajmentes (szintetikus) képre végzett genetikusan optimizált algoritmus-futtatás eredménye

A mesterséges neurális hálózat és a genetikusan optimizált algoritmus ötvöztetésével valóban sikerült útszakaszok detektálására eljárást fejleszteni. A szintetikus és valós bináris képek alapján megállapítható, hogy hibátűrésnek jelentősége van a munka során. Mivel a genetikusan optimizált algoritmus számára nehezebb alkalmas paraméterezést találni (populáció mérete, mutációs és keresztezési faktorok értéke, generációk száma stb.), ezért a bemenet zajszűrése, pl. képmorfológiával egyszerűbb, így az eljárás hatékonyabb. További hátrány a genetikusan optimizált algoritmus szemben az, hogy a számításigénye jócskán meghaladja a zajszűrő módszerek igényét.

## 2.2.2 Hálózati szemléletmód alkalmazása utak detektálása során

Az irodalomban bemutatott útszakasz detektálási megoldások némelyike a nagyobb geometriai és topológiai pontosság érdekében az egyes megtalált és felismert szakaszokat hálózatokká igyekezett alakítani. Ezeknek a filozófiája szorosabban kötődik az utak hálózati szerepéhez. A képfeldolgozási technikákat ötvözni lehet olyan számítási módszerekkel, amelyek kifejezetten struktúrákba szerveződő elemeket képesek kinyerni vagy azok közül bizonyosakat kiválasztva lehet magukat a struktúrákat felismerni. Az úthálózatok kapcsán ilyen eszköznek tekinthetjük a számítógépes látás témakörében használt Hough- és Radon-transzformációkat.

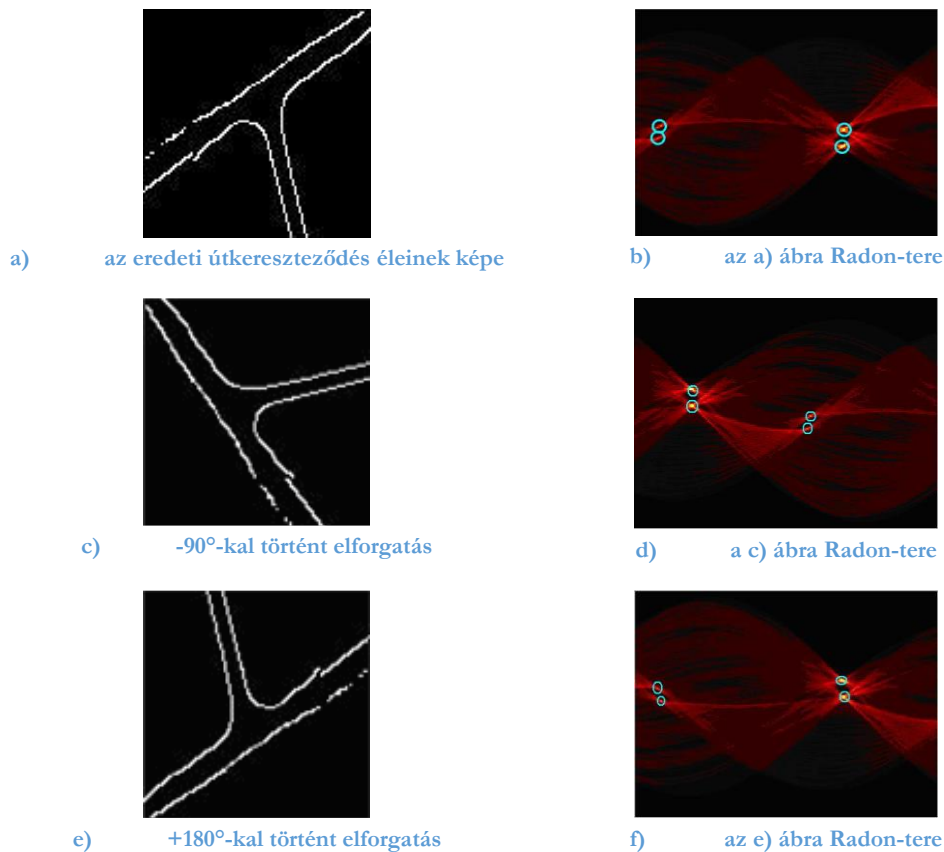
A Radon-transzformáció (RT)  $x$  és  $y$  képkoordinátákra felírható függvény integráltranszformációja, amely tetszőleges  $\theta$  elforgatás mellett kapható új képkoordinátákat szolgáltatja a következők szerint:

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x' \cos \theta - y' \sin \theta, x' \sin \theta + y' \cos \theta) dy' \quad (7)$$

A gyakorlatban az integrálás helyett összegzést végeznek, ahol a lényeges paraméterek a  $\theta$  szög és  $x'$  felbontása. A transzformáció eredménye, az ún. sinogram felületnek is tekinthető, amelynek lokális maximumhelyei a nagyobb megbízhatóságú vonalas képtartalmat (pl. utakat) jelentik. Ezeknek a lokális maximumoknak az automatikus kiválasztása után végzett inverz Radon-transzformáció (IRT) visszatérést biztosít az intenzitás térre. A transzformáció és inverze működését tekintve analóg a Fourier-transzformációval (FT) illetve annak inverzével (IFT), nevezetesen a Fourier-térben végzett kiválasztás után történő inverz transzformáció már csak a kiemelő objektumféleséget szolgáltatja. (A Fourier-transzformációhoz kötődő szoros kapcsolatot az orvosi gyakorlatban a tomográfiai felvételek feldolgozásában ki is használják.)

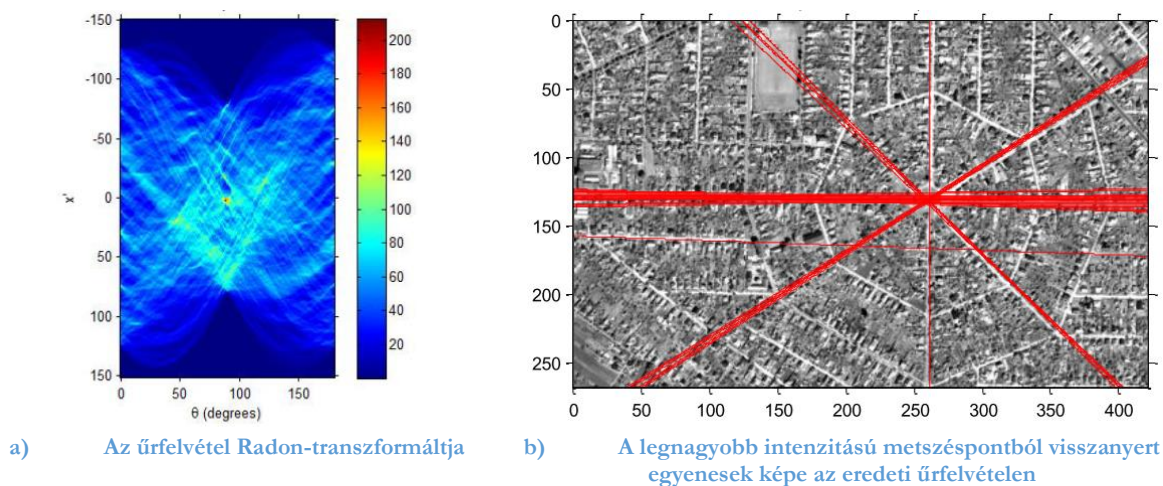
A Radon-transzformáció ismert tulajdonsága az, hogy forgatásinvariáns. Ennek igazolására saját példa látható a 2.6. ábrán (Tóth & Barsi, 2005).





2.6. ábra: Forgatásinvariáns jelleg kimutatása háromágú útkereszteződés példáján keresztül. A Radon-térben a két út mindkét széléhez tartozó él jelentkezik a négy markáns csomópontban a hasonló sinogram-mintázat mellett

A 2.7. a ábrán a budapesti agglomerációban található Maglód település pókhálószerű utcahálózatának sinogramja látható. Az RT előtt a nyers űrfelvételt bikubikus interpolációval 5 m-es felbontásra újramintavételezttem, majd az utcák intenzitástartományára fókuszált küszöböléssel bináris képpé alakítottam és cirkuláris átlagoló szűrővel simítottam. A vörös árnyalatú helyek jelentik a lokális csomósodásokat, amelyeket küszöböléssel kiválasztva, majd az IRT elvégzésével azok az eredeti 61 cm terepi geometriai felbontású Quickbird űrfelvételre rajzolva megmutatják a település szerkezetének főbb elemeit (2.7. b ábra).



2.7. ábra: Maglód űrfelvételén a főbb utak detektálása Radon-transzformációval

A Radon-transzformációval végzett kísérletek alapján megállapítható, hogy út- és utcahálózatra alapozott városszerkezeti elemzés ilyen megoldással végezhető (Arpad Barsi, 2011). A módszer hátránya, hogy a Radon-transzformációból kizárólag egyenesek képe kapható meg, így összetett hálózat esetében az utak egyes szakaszai detektálhatók ily módon. A bonyolult töréspontokból álló úthálózat, továbbá az ívelt útszakaszok a megoldás révén nem térképezhetők. Ennek ellenére a szabályos jelleggel kialakított területek útinfrastuktúrája (pl. amerikai nagyvárosok) számára a módszer alkalmazható.

Összetett hálózat kezelésére ezért másik MI-módszert vizsgáltam meg. Fritzke 1995-ben közzétett egy cikket, amelyben növekvő neurális gáz (*growing neuron gas* – GNG) algoritmusát adja meg topológiával rendelkező adatokra (Fritzke, 1995). A módszer adaptációja digitális képeken leképződött úthálózat esetében ezért reménytelen volt. Az eredeti algoritmus tetszőleges mennyiségű  $n$ -dimenziós adatponton működik. A kompetitív Hebb-tanulási szabályt alkalmazó módszer számítási csomópontokból és azok közötti élekből definiált gráfon működik (Fritzke, 1998). Az élek egység súlyúak, csupán a topológia definiálásához van rájuk szükség. Az eljárás során az élekhez életkort, a csomópontokhoz hibaértéket rendelünk. Az egyes iterációs lépésekben ezek módosításra kerülnek.

Az implementált eljárás a következő lépéseket tartalmazta:

- (1) két kezdeti neuron pozíciójának (súlyvektorának) felvétele ( $w_a$  és  $w_b$ ), a neuron közötti összekötöttséggel ( $\mathbf{A}_{a,b}$ )
- (2) a legközelebbi  $s_1$  és második legközelebbi  $s_2$  csomópont kiválasztása Euklideszi távolságnorma szerint
- (3)  $s_1$  éleihez tartozó kor megnövelése
- (4)  $w_{s_1}$  csomóponti pozíció és  $\xi$  adatponti pozíció közötti hiba négyzetének kiszámítása:  

$$\Delta_{\xi, s_1} = \|w_{s_1} - \xi\|^2,$$
ugyanaz minden csomópontra is kiszámításra kerül
- (5)  $s_1$  és minden kapcsolódó  $n$  szomszédjának mozgatása  $\xi$  adatpont felé  $\varepsilon_b$  és  $\varepsilon_n$  tényezőkkel:  

$$\Delta w_{s_1} = \varepsilon_b (\xi - w_{s_1})$$

$$\Delta w_n = \varepsilon_n (\xi - w_n)$$
- (6) ha létezik  $s_1 s_2$  él (azaz  $\mathbf{A}_{s_1, s_2} \neq 0$ ), annak életkorának megnövelése; ha nem létezik az él, annak létrehozása
- (7) minden  $a_{max}$ -nál idősebb él törlése; ha diszjunkt pont keletkezik, akkor annak törlése is
- (8) minden  $\lambda$  lépésben
  - a. a legnagyobb hibájú  $q$  csomópont kiválasztása
  - b.  $q$  legnagyobb hibájú kapcsolódó  $f$  szomszédjának kiválasztása
  - c.  $r$  új csomópont létrehozása  $q$  és  $f$  közé:  $w_r = \frac{1}{2}(w_q + w_f)$
  - d.  $rq$  és  $rf$  élek létrehozása,  $qf$  él törlése
  - e.  $q$  és  $f$  csomópontok hibájának csökkentése  $\alpha$  tényezővel
  - f.  $r$  hibájának beállítása  $q$  új hibaértékére
- (9) minden csomópont hibájának csökkentése  $d$  tényezővel
- (10) az iteráció befejezése a maximális lépésszám elérésekor vagy vissza a 2. lépésre

Az eljárás futtatásához színes ortofotón előkészítő képfeldolgozó lépéseket végeztem. Először az RGB-sávokban egyszerű intenzitás alapú küszöbölést végeztem az utakat alkotó pixelek kiválogatásához. A három sávon belül a küszöböknek megfelelő pixeleken HSV színtérre tértem át, majd az árnyalatcsatornán végzett

küszöbölésre erózióval simítottam a bináris képet. Az adatpontok számának csökkentése érdekében mintavételeztem az eredményképet, majd a pixelek  $x$  és  $y$  pozícióiból létrehoztam a kétdimenziós adatpontok halmazát.

A növekvő neurális gáz algoritmust a következő paraméterezés mellett lefuttattam az adathalmazra:

2.3. táblázat: Útdetektálási GNG paraméterkészlete

Paraméter	Érték
Maximális neuronszám	200
Maximális iterációszám	80000
Neuron beszűrési arány ( $\lambda$ )	100
Hibacsökkentési tényező ( $d$ )	0.0005
A győztes súlymódosítási tényezője ( $\varepsilon_b$ )	0.005
A győztes kapcsolódó szomszédainak súlymódosítási tényezője ( $\varepsilon_n$ )	0.0006
Maximális életkor ( $a_{max}$ )	50
Hibacsökkentési tényező új csomópont létrejöttkor ( $\alpha$ )	0.5

A beállításokkal elvégzett elemzés eredménye a 2.8. ábrán látható (Barsi, 2008).



2.8. ábra: Növekvő neurális gáz (GNG) segítségével azonosított utcahálózat 0.2 m-es terepi geometriai felbontású légi-fényképen

A növekvő neurális gáz eljárása tehát minél jobb illesztés esetén egyre nagyobb súlyt rendel a csomópontokhoz. A megoldás a kapcsolatok létrehozásával és megszüntetésével dinamikusan kezeli a neurális gázt, ugyanakkor a hálózat mérete szabályozható. Szerencsés, hogy a számítás elkezdéséhez nincs szükség előzetes helyadatokra, az iteráció során önszerveződő módon alakul ki a hálózat.



## 2.3 Közlekedési csomópontok térképezése

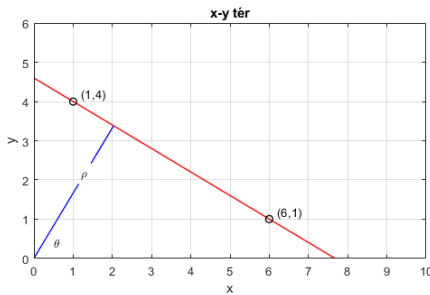
Az úthálózati gráf csomópontjaiban az utak kereszteződései, a közlekedési csomópontok állnak. Ezek térképezéséhez olyan eljárásokra van szükségünk, amelyek képesek vagy az utak metszéseként vagy akár azoktól függetlenül a keresztezési helyeket detektálni.

A rendelkezésünkre álló eszköztár meglehetősen széles, hiszen a 2.2.2 fejezetben már ismertetett Radon-transzformáció egyenesek azonosítására alkalmas, így a kereszteződések esetében is használható módszer. Természetesen a mesterséges neurális hálózatok segítségével hívásával is tudunk csomóponti felismerést végezni. A 2.3.1 fejezetben ennek a fejlesztési iránynak járjuk körbe a lehetőségeit.

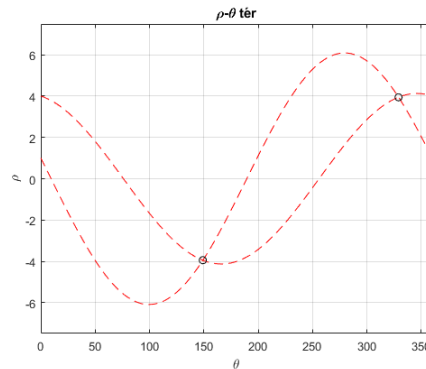
Ha a neurális hálózatok kialakításánál a topológiát hangsúlyos elemmé tesszük, akkor egy korábban nem létező mesterséges neurális hálózattípus hozható létre. Az önszerveződésre, mint tanulási módszerre alapozott neurális hálózat szigorú topológiát követ; működését és használatát a 2.3.2 fejezetben mutatom be.

### 2.3.1 Csomóponti detektálás mesterséges neurális hálózati rendszerrel

A közlekedési csomópontok képeire a városi légifényképekhez hasonlóan alkalmaztuk a Radon-transzformációt, azonban magának a keresztezésnek a kimutatására a rokon Hough-transzformáció is megfelel.



a) Két pontjával adott egyenes az xy-térben. Az origóból induló merőleges mentén mérhető  $\rho$ , szöge  $\theta$



b) A két pont Hough-térbeli képe (szaggatott piros sinogram-görbékkel). A görbék metszéspontjában az egyenes egyenlete Hesse-alakban

2.9. ábra: Egyenes reprezentációja Hesse-féle alakban x-y és  $\rho$ - $\theta$  koordináta rendszerekben

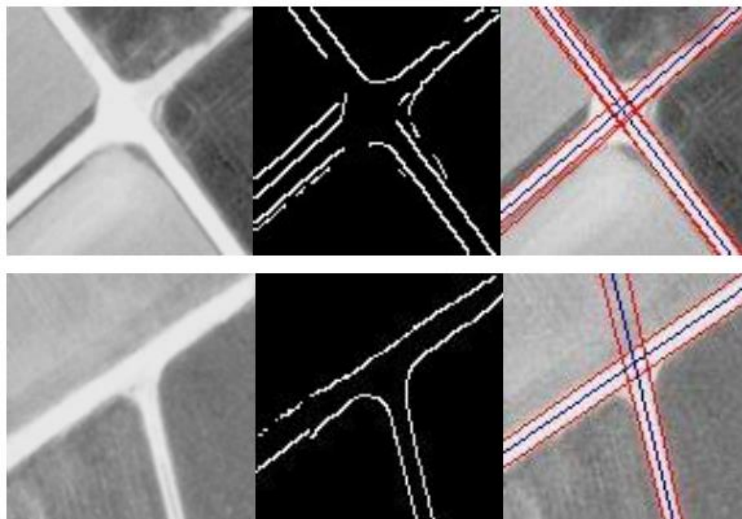
A Hough-féle megoldás azt a megközelítést használja, hogy a síkbeli egyenes egyenlete leírható a Hesse-féle alakkal is, azaz

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (8)$$

ahol a 2.9. ábra szerint  $\rho$  az origótól mért merőleges távolság,  $\theta$  pedig az egyenes normálisának hajlásszöge. Az egyenesre illeszkedő pontok Hough-térben értelmezett megfelelői szintén görbék; a Radon-transzformációhoz hasonlóan a görbe képeinek diagramját sinogramnak nevezzük (Tóth & Barsi, 2005).

Mind a Radon, mind a Hough-transzformációkkal végzett kereszteződés-detektálás előzetes feldolgozási lépéseket igényel. Ezek általában a következők: érdeklődési terület definiálása, simítás és élkeresés többnyire a konvolúció segítségével.

A 2.10. ábra négy- és háromágú kereszteződésekre alkalmazott transzformációk lépéseinek eredményeit mutatja.

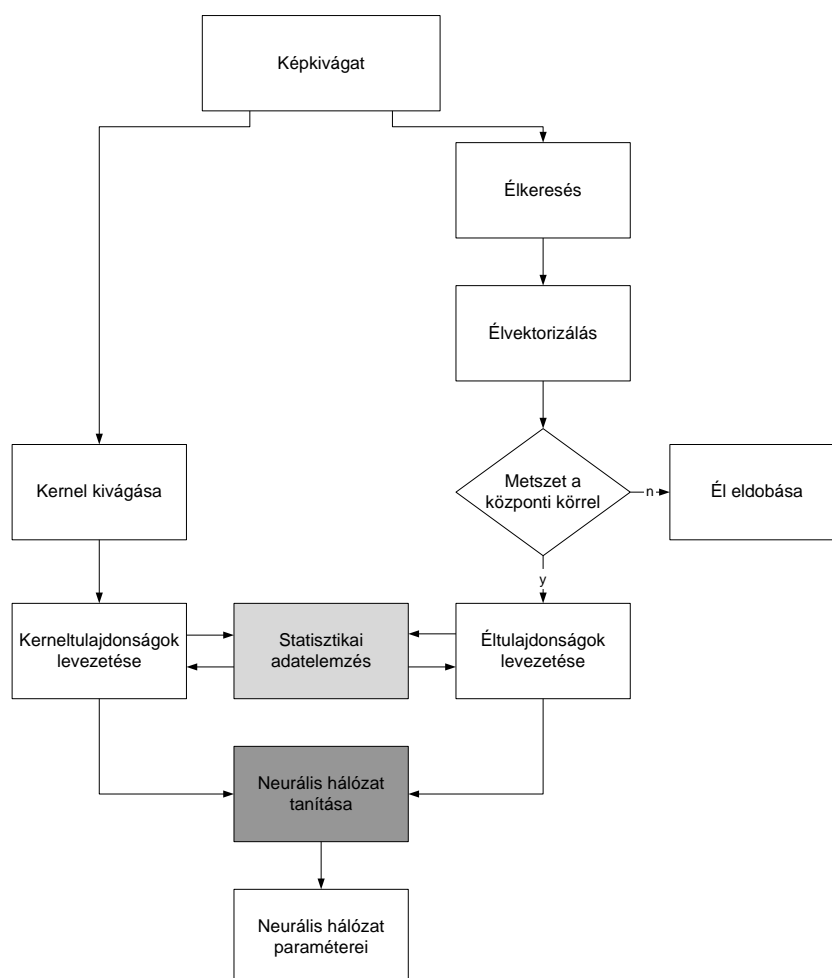


2.10. ábra: Hough-transzformációval detektált egyenesek kitűnően jellemzik a kereszteződési helyeket. A felső ábrásor egy négyágú, az alsó egy háromágú kereszteződés elemzése. Az első oszlopban a kiindulási képek, a középső oszlopban az élkiemelés eredménye, a jobb oszlopban a detektált egyenesek láthatók. A piros vonalak az utak széleit, a kék a tengelyeket jelentik. (Tóth & Barsi, 2005)

A két bemutatott transzformáció egy kifejezetten kereszteződés-detektálási eljárásba is beépíthető (Tóth & Barsi, 2005).

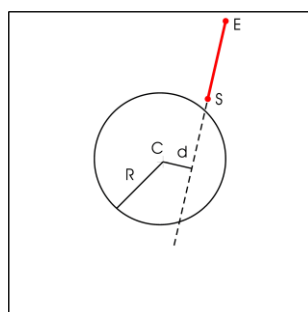
A képfeldolgozás iménti klasszikus megoldása mellett nagyon érdekes téma ugyanerre az eredményre vezető, a mesterséges intelligenciát alkalmazó módszertan kidolgozása. Kutatásomban ezért ebbe az irányba fordultam.

A transzformációkkal tehát a képtartalom jellegzetes egyenesei nyerhetők ki. Az integrált eljárás ezért ebből az alapkoncepcióból indult ki. A JEANS (*Junction Extraction by Artificial Neural Network System*) kutatási projektben olyan módszer került kidolgozásra, amely légifényképből előállított ortofotó tematikus tartalmára fókuszál, s emeli ki a lehetséges kereszteződéseket. A 2.11. ábra mutatja a folyamat egészét.



2.11. ábra: A JEANS-projekt áttekintő folyamatábrája a kiértékelésre fejlesztett mesterséges neurális hálózat tanítási folyamatáig (Barsi, Heipke & Willich, 2002)

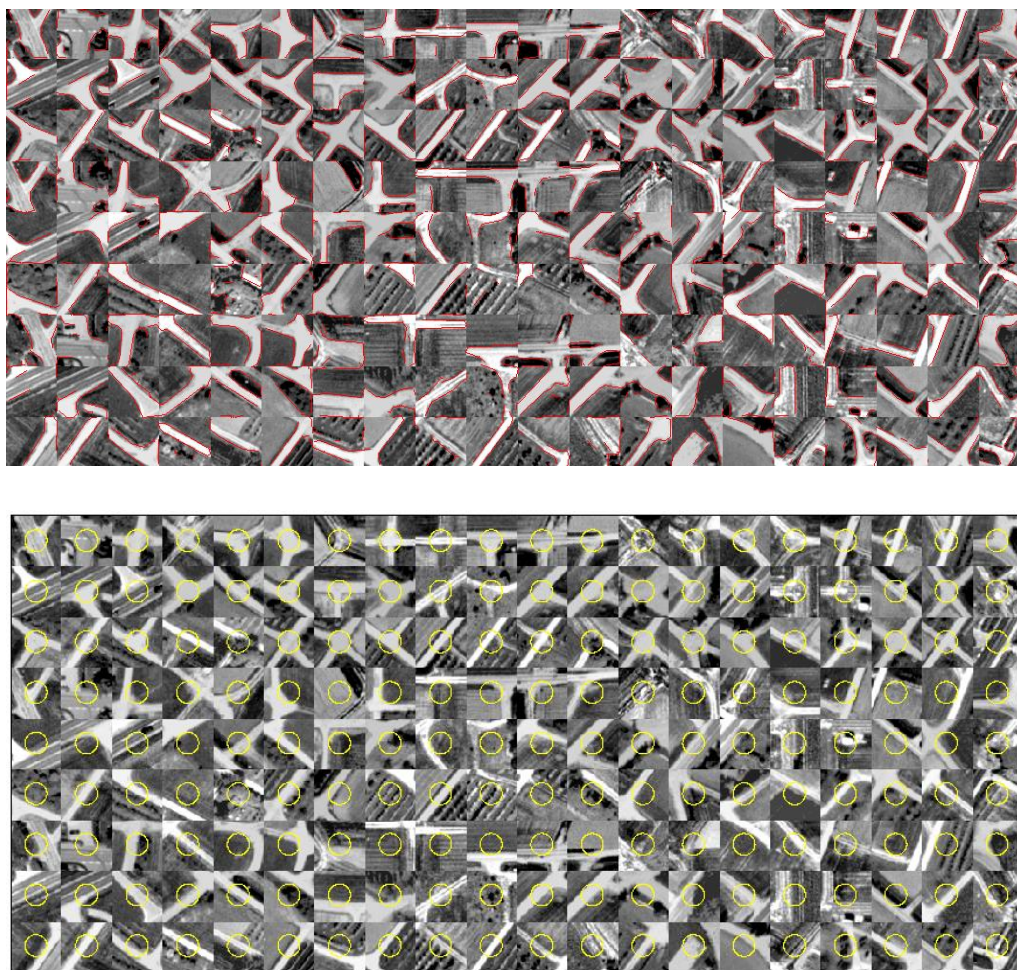
Az eljárás egy futó ablak alkalmazásával érdeklődési területet vág ki a képből, amelyen Deriche-eljárásra alapozott élkereséssel, majd Ramer-vektorizálást követően egy körfeltétel (2.12. ábra) kiértékelésével tesz szert olyan jellemzőkből álló vektorra (*feature vector*), amely hibavisszaosztásos előrecsatolt mesterséges neurális hálózat (*backpropagation feedforward artificial neural network*) számára jelent bemenetet. A jellemzővektor olyan elemeket tartalmaz, mint az élek súlypontjának koordinátái, az élek összhossza, az élek átlagos hossza és a hosszok szórása, az élek irányainak szórása, stb. Összesen ehhez hasonló 16 jellemző került megállapításra, amelyekből faktoranalízissel sikerült kiválasztani azt a kilencet, amely a neurális hálózat tanításánál bemenetként szolgált (Á. Barsi & Heipke, 2003).



2.12. ábra: A csomóponti modell előválogató központi köre, amely a futóablakba eső vektorizált elemek érintettségét vizsgálja, majd a jellemzőket vektorban foglalja össze. A vektor kezdőpontja  $S$ , végpontja  $E$ .

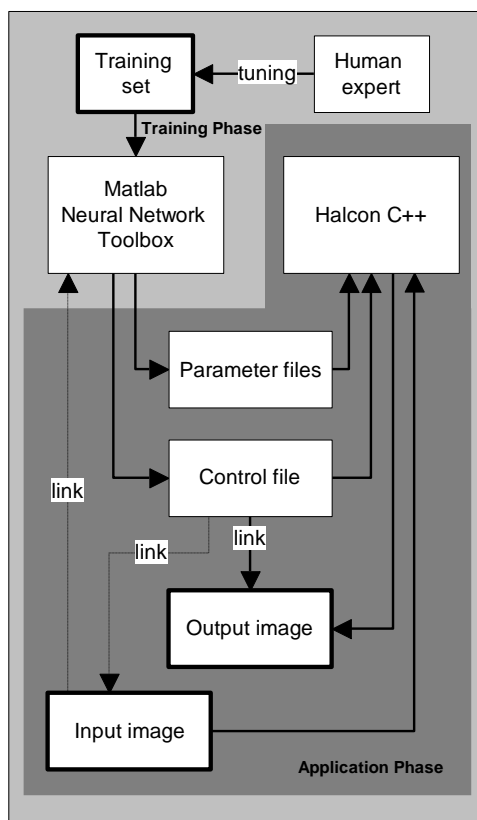
A rendkívül hatékony Levenberg-Marquard optimalizálással végzett tanulást követően a neurális hálózat képes az ortofotó egészének tematikus kiértékelésére. A neurális hálózat tanításához 60 kereszteződés és 120 nem-kereszteződés ablakára volt szükség. Az ablak mérete a geometriai felbontás függvénye; a tesztprojektben német mintaterületről (Frankfurt am Main közelében) készült 40 cm-es terepi felbontású fekete-fehér ortofotó esetében  $51 \times 51$  pixelre, azaz mintegy  $20.4 \times 20.4$  m méretű ablakra volt szükség (2.13. ábra). A tesztadatok a WIPKA (*Wissensbasierter Photogrammetrisch-Kartographischer Arbeitsplatz*)-kutatásból származnak (A. Barsi & Heipke, 2003), amelynek célja a német Hivatalos Topográfiai-Kartográfiai Információs Rendszer (ATKIS) adatbázisának automatizált ellenőrzése és frissítése ortofotók alapján.

A neurális hálózati bemenet előállításához a tulajdonságvektor elemeinek levezetésében a kulcs a központi kör alkalmazása (2.12. ábra), amely előválogatja a Deriche-Ramer előkészítéssel kapott vektorokat.



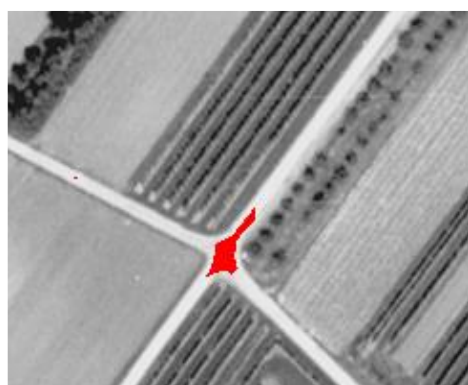
2.13. ábra: Élkeresés és vektorizálás eredményei (fent), valamint a kernel központi körének elhelyezkedése (lent) a neurális tananyagban szereplő kereszteződés és nem-kereszteződés mintákon

A tanítással kialakított neurális döntési mechanizmus már a teljes kiértékelendő képterületen halad végig és elemzi a képtartalmat. Ennek a második lépcsőnek a megoldásában eltérő rendszerek integrációjával sikerült hatékony módszert találni. Az integráció következtében szükséges vezérlések és tényleges adatmozgatások a 2.14. ábrán láthatók.



2.14. ábra: A JEANS kiértékelési mechanizmusa az integrált rendszerek közötti kommunikáció elemeivel együtt

A tanítást követően a neurális hálózat már felhasználható az ortofotó ismeretlen képrészleteinek kiértékelésére. Abban az esetben, amikor csomópontot jelző pixelkombinációt talál, megjelöli azt (2.15. a ábra). Ez a felismerési képesség akkor is megmutatkozik, amikor az utak nem szintbeli kereszteződéssel rendelkeznek, mint amilyen a 2.15. b ábrán híd esetén látható.



a) helyesen megtalált utak keresztezési helye



b) nem szintbeli útkeresztezés megjelölése

2.15. ábra: A JEANS-technológia segítségével ismeretlen képrészleten elvégzett felismerés eredményeként kapott csomóponti helyek

A módszerrel nagy számításigénye miatt csak kisebb kiterjedésű terület kiértékelésére nyílt mód. Ezeken a futtatásokon is látszik, hogy a mesterséges intelligencia felhasználásával objektumfelismerés végezhető – akár fekete-fehér ortofotókon is (2.16. ábra).





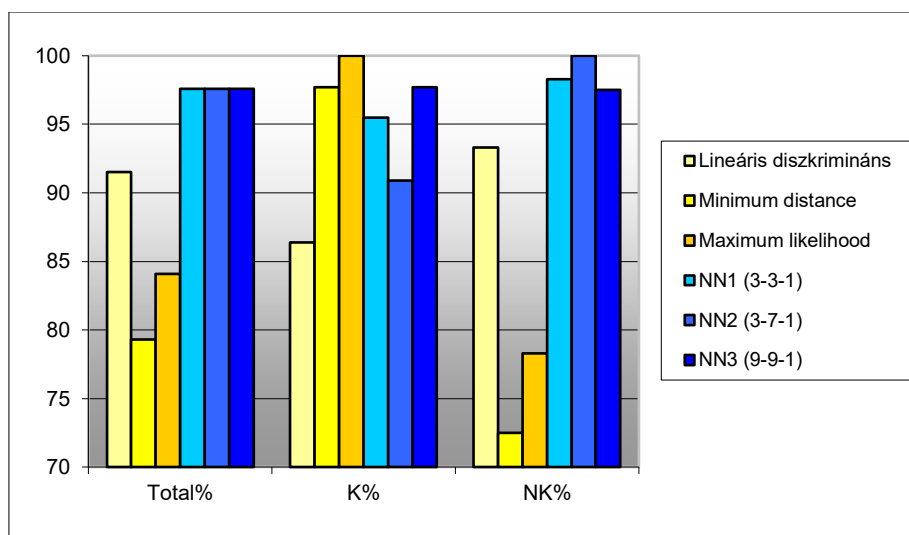
a) kiterjedtebb vizsgálati terület a megjelölt csomóponti helyekkel. A sárga körök a tényleges és megtalált csomópontokat jelölik.



b) a megjelölt csomóponti helyek szűrésével és megnövelt jellel történő ábrázolása. A sárga körök a helyesen felismert csomópontok, a négyzetek az elmulasztott csomópontok helyeit jelölik.

2.16. ábra: Kiterjedt terület vizsgálata JEANS-módszerrel

A vizuális eredményen kívül néhány numerikus mérőszám levezetése az eljárás értékelésében hasznos. A JEANS eredményeiről a legjobb jellemzést a távérzékelésben használt teljes felismerés jóságát (Total%), valamint a kereszteződések (K%) és nem-kereszteződések (NK%) százalékos jóságát mutató mérőszámok adják.



2.17. ábra: A JEANS-módszer felismerési jellemzői háromféle neurális és háromféle klasszikus statisztikai döntési algoritmus futtatása után. A neurális hálózatok szerkezetét a zárójelben kifejezett számok adják meg.

### 2.3.2 Önszerveződő neurongráf

Az útkereszteződések tanulmányozása közben vizsgálatokat folytattam a T. Kohonen által kidolgozott önszerveződő térképekkel (*Self-Organizing Map* – SOM vagy *Self-Organizing Feature Map* – SOFM) (Kohonen, 1995). Ezek a neurális hálózatok zárt, kötött topológia mentén rendezett neuronrétegekből állnak, amelynek tanulási algoritmus a „győztes mindent visz”-típusú, azaz a hálózat bemenetére érkező jelsorozat feldolgozásakor kiválasztásra kerül egy rétegen szereplő neuron, amelynek súlya növekedni kezd, azaz erősítést kap.

Az  $n$ -dimenziós súlyok terében az egyes neuronokat a következő vektor írja le:

$$\mathbf{m} = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T \in \mathfrak{R}^n \quad (9)$$

Ehhez hasonlóan az adatpontok szintén  $n$ -dimenziós vektorok:

$$\mathbf{x} = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n]^T \in \mathfrak{R}^n \quad (10)$$

A győztes az a  $c$  indexű neuron, amelyre igaz, hogy

$$c = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \left\{ \|\mathbf{x} - \mathbf{m}_i\| \right\} \quad (11)$$

Ha a rendszerünkben  $q$  darab neuron szerepel, érvényes, hogy  $i = 1 \dots q \in \mathbb{N}$ .

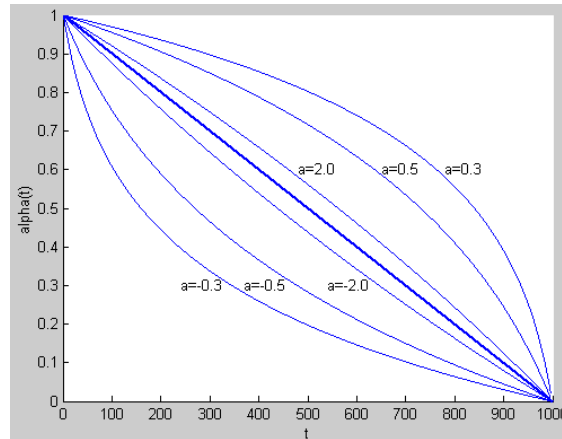
A tanulás során a Kohonen-féle súly-módosítás a következő:

$$\mathbf{m}_i(t+1) = \mathbf{m}_i(t) + h_{ci}(t) \cdot [\mathbf{x} - \mathbf{m}_i(t)] \quad (12)$$

ahol az egymást követő epochák a  $t$  és  $t+1$  jelölésűek, valamint a súlyok módosítási tényezője

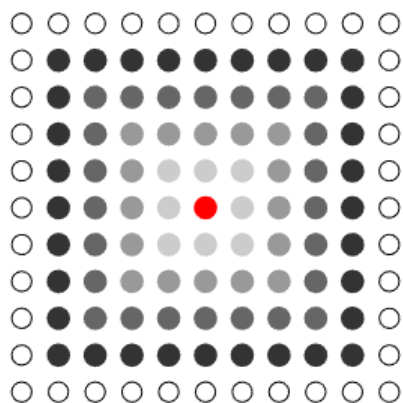
$$h_{ci}(t) = \begin{cases} \alpha(t) & \text{ha } i \in N_c(t) \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (13)$$

Az iménti kifejezésben a győztes neuron szomszédságát  $N_c$  jelenti a  $t$  epochára, a tanulási tényező (*learning rate*) pedig  $\alpha(t)$  monoton csökkenő függvény szerint (2.18. ábra).



2.18. ábra: Többféle lefutású  $\alpha(t)$  tanulási tényező függvény

A győztes neuron szomszédságát lehetséges például szabályos négyzetrácsban kezelni, ekkor a 2.19. ábrán látható a szomszédság alakulása.



2.19. ábra: A közepén látható piros színű győztes neuronhoz képest a szabályos négyzetrácsban elhelyezkedő szomszédos neuronok, amelyek távolsága a győzteshez képest a négyes (N4) szomszédságnak megfelelően egyre növekszik

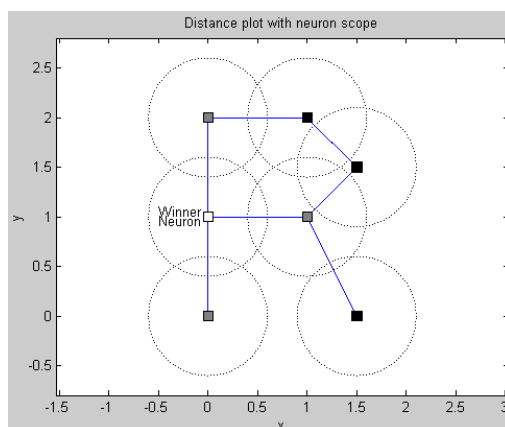
A tanulás leírható pszeudokóddal:

```

(1)   for t = 0 to max_epochs
(2)       for l = 1 to max_points
(3)           for j = 0 to max_neurons
(4)               winner_selection (Győztes kiválasztása)
(5)           endfor
(6)           for j = 0 to max_neurons
(7)               weight_update (Súlyfrissítés)
(8)           endfor
(9)       endfor
(10)  endfor

```

A három egymásba ágyazott ciklus szerint az összes rendelkezésre álló epochának megfelelően megyünk végig az adatpontokon és a neuronokon. A 4. lépésben a (11) kifejezés szerint győztest választunk, majd a 7. lépésben (12)(14) és (13) szerint módosítjuk a győztes neuron és szomszédságának súlyait (2.20. ábra).



2.20. ábra: A győztes neuron és a szomszédságában lévő neuronok hatásköre. Az ábrán a neuronok a győztestől való adjacencia szerinti növekvő távolság szerint egyre sötétebb színűek

Az algoritmus előbb a neuronok durva elrendezését (*ordering*), majd finomhangolását (*tuning*) végzi el. A szükséges epocha száma feladatonként változik, többnyire néhány ezres, esetleg tízezres nagyságrendű. Az úthálózat csomópontjainak tanulmányozása hagyományosan azok topológiai leírásait is igényli. A topológiai jellemzéshez a csomópont geometriai leírása természetesen méretaránytól függően részletpontokat és



azok összekötéseit igényli. Topográfiai méretarány mellett ( $\sim 1:10000$  esetén) az utak már csak középvonalakkal írandók le, így a topológia-viszony áttekinthető. Ennek a megadási módnak az önszerveződéssel történő egyesítésére dolgoztam ki az önszerveződő neurongráfok (*Self-Organizing Neuron Graph* – SONG) modellt.

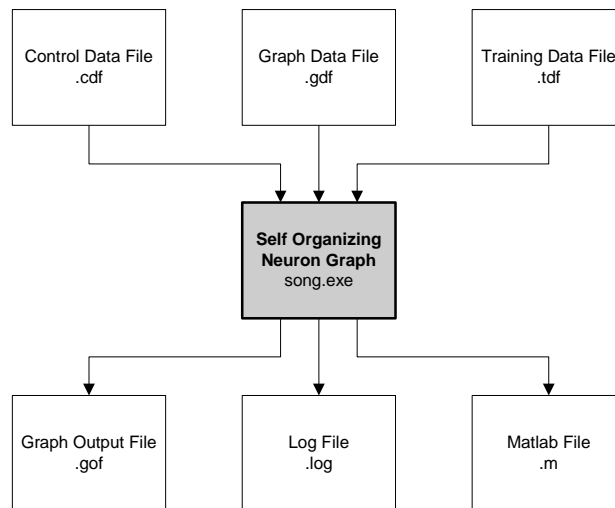
A SONG esetében az alapvető kiindulás a neuronok elrendezésében egy gráffal történik. Ennek a gráfnak a csomópontjai a neuronok, az élek mentén definiáltak az összeköttetések, vagyis a szomszédság. A SONG modell használatához a Kohonen-féle tanulási szabályt lehet alkalmazni, azonban a neuronsúlyok módosítási tényezőjéhez új definícióra van szükség. A gráfoknál ismert szomszédsági viszonyok megadására az általánosított adjacencia vagy az általánosított távolság-mátrix alkalmas. Így a (13) összefüggés módosítása a következő (A Barsi, 2003; Arpad Barsi, 2004a, 2004b):

$$h_{ci}(t) = \begin{cases} \alpha(t) & \text{ha } \mathbf{A}_{ci}^k < d(t) \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (14)$$

vagy

$$h_{ci}(t) = \begin{cases} \alpha(t) & \text{ha } \mathbf{D}_{ci}^k < d(t) \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (15)$$

A (14) kifejezésben  $\mathbf{A}_{ci}^k$  jelenti az általánosított adjacencia mátrixból a győztes neuronra vonatkozó értéket, míg a (15) képletben  $\mathbf{D}_{ci}^k$  hasonlóképpen az általánosított távolság mátrix elemét jelenti.  $d(t)$  függvény az epochától függő adjacencia, illetve távolság-küszöbérték. Az általánosított adjacencia-mátrix előállítható a kezdetben ismert neurongráf direkt összeköttetéseinek felhasználásával, például a Henley-féle mátrix-hatványozási (Henley & Williams, 1973) vagy a Floyd-Warshall (Warshall & Stephen, 1962) algoritmusokkal. Ekkor a tanulás alatt statikus mátrixot kapunk, amelyben szereplő adjacencia értékek nem változnak. Ezzel ellentétben az általánosított távolság-mátrix levezetéséhez a már említett Floyd-Warshall eljárás mellett az „all-pair” jelleggel használt A\* keresés is használható (Russell & Norvig, 2005). Ez esetben azonban minden epochában újra kell számolni a távolság-mátrixot, mivel annak elemei dinamikusan változnak. A bemutatott elvi megoldás megvalósítására egy később grafikus felhasználói felülettel rendelkező szoftvert fejlesztettem. A rendszer elvi sémáját a 2.21. ábra mutatja.



2.21. ábra: A SONG-implementáció rendszersémája

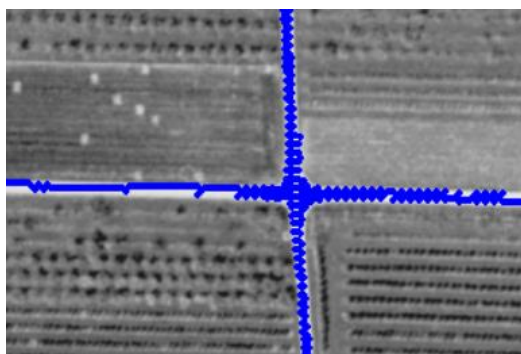
A működéshez az adatpontok a *tdf*, a gráf a *gdf* állományban található. A futás paramétereit vagy *cdf* vezérlő-állományból, vagy grafikus felhasználói felületről állíthatók be 2.22. ábra. Utóbbi a kísérletek során a paraméterek hatásának tanulmányozására alkalmas. Nagyobb adatmennyiség kezelésekor a vezérlőállomány tesz jó szolgálatot.

The screenshot shows the 'winSONG - Self-Organizing Neuron Graph v1.0' window. It has a standard Windows-style title bar with a close button. The interface is organized into several panels:

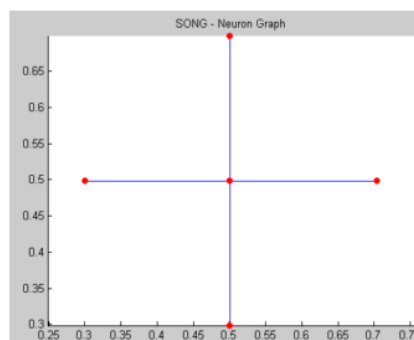
- Input files:** Fields for Project name (pentagon), Project directory (s:\SONG\pentagon), Graph data file (\*.gdf) (pentagon), and Training data file (\*.tdf) (pentagon).
- Output files:** Fields for Log file (\*.log) (pentagon), Graph output file (\*.gof) (pentagon), and Matlab file (\*.m) (pentagon). There are checkboxes for 'Graph output file' and 'Matlab file', both of which are checked. Below these are fields for 'Output display width' (5) and 'Output display precision' (2).
- Control data file:** Field for Control file (\*.cdf) (penta), with 'Load cdf file' and 'Save cdf file' buttons.
- Computing:** 'Start' and 'Stop' buttons.
- Processing parameters:**
  - Number of graph nodes (neurons): 20
  - Number of training data points: 3302
  - Size of maximal neighborhood (k): 6
  - Neighborhood measure by:** Radio buttons for 'Adjacency (Ak) matrix' (selected) and 'Distance (Dn) matrix'.
  - Creating Dn matrix by:** Radio buttons for 'A\* search algorithm' and 'Floyd-Warshall algorithm' (selected).
  - Winner distance:** Radio buttons for 'Euclidean' (selected) and 'Manhattan'.
  - Neighborhood distance:** Radio buttons for 'Euclidean' (selected) and 'Manhattan'.
- Ordering phase:**
  - ☒ Neuron scope: 100.00
  - Starting learning rate: 0.01
  - Ending learning rate: 0.00
  - Starting neighborhood: 6
  - Ending neighborhood: 1
  - Number of epochs: 300
  - Progress bar.
  - Alpha function:** Radio buttons for 'Linear' (selected) and 'Logarithmic' (-0.5).
  - Neighborhood function:** Radio buttons for 'Linear' (selected) and 'Logarithmic' (-0.5).
- Tuning phase:**
  - ☒ On/Off
  - Neuron scope: 100.00
  - Starting learning rate: 0.003
  - Ending learning rate: 0.00
  - Starting neighborhood: 1
  - Ending neighborhood: 1
  - Number of epochs: 10000
  - Progress bar.
  - Alpha function:** Radio buttons for 'Linear' (selected) and 'Logarithmic' (-0.5).
  - Neighborhood function:** Radio buttons for 'Linear' (selected) and 'Logarithmic' (-0.5).

2.22. ábra: Grafikus felhasználói felület a SONG-rendszer vezérléséhez

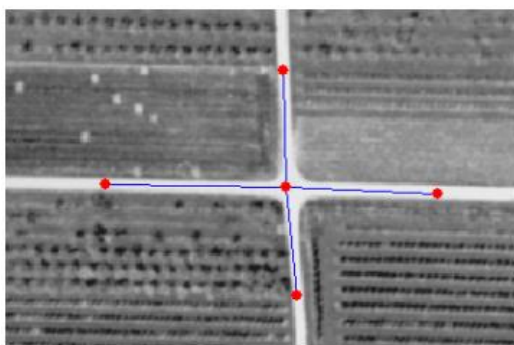
A digitális ortofotókon azonosítható közlekedési csomópontok esetében a képfeldolgozás műveletei közül előfeldolgozásként egyszerű küszöbölést alkalmazva az utakat jelentő pixelek megjelölhetők, majd az előre elhatározott, keresendő csomóponttípus (pl. négyágú kereszteződés) gráfját elkészítve a SONG-modell futtatható. A 2.23. a ábrán látható egy kereszteződés binárisá alakított útpixeljeivel, a 2.23. b ábrán a csomóponttípus gráfja, a 2.23. c és d ábrákon a SONG révén megtalált eredeti és elforgatott helyzetű elrendezés.



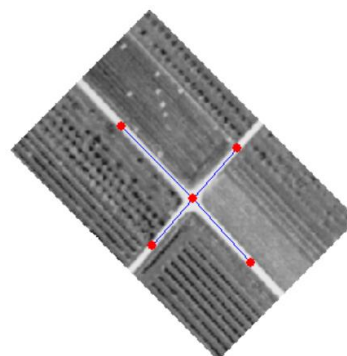
a) binarizált útpixellek (kék), mint bemenő adatpontok a SONG-algoritmus számára



b) négyágú kereszteződés alapgráfja (a pontok jelentik a neuronokat, az élek mentén értelmezzük a szomszedságot)



c) végleges gráfponthoz, mint a megtalált kereszteződés leíró pontjai

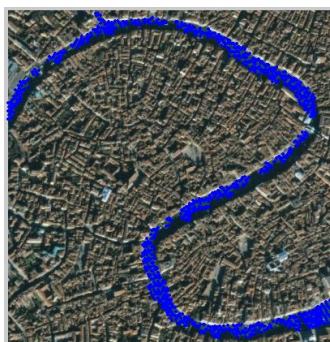


d) forgatás-függetlenség kifejezése ugyanazon csomópont esetében

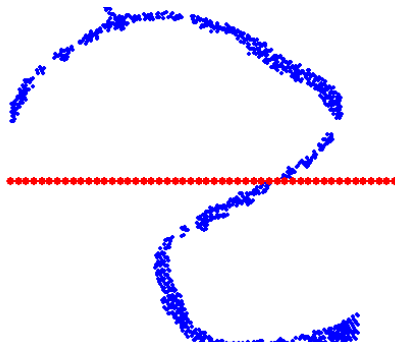
2.23. ábra: SONG-modell működése. A bemenet binárisan szegmentált digitális kép (a), a kiindulási gráf, mint topológiai kezdeti feltétel (b); a tanulás eredménye a megtalált végleges kereszteződés-leíró pontok gráfja (c). A modell forgatás-független, amit a (d) ábrán elforgatott eredeti kép feldolgozása igazol.

A SONG módszertanában különféle alakú monoton csökkenő tanulási függvény alkalmazható, illetve ilyen előre ismert vagy keresett struktúrák más alkalmazási területeken is beváltak (A. Barsi, 2003a, 2003c).

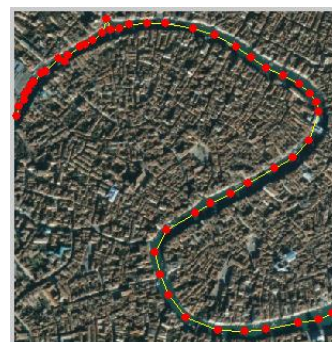
A SONG-módszer segítségével lineáris objektumok követése is lehetséges anélkül, hogy előzetesen az objektum pontjainak koordinátái ismertek lennének. Ennek illusztrálására a velencei Canale Grande példáját mutatom be. A kezdeti neurongráf egy egyenes mentén elosztott neuronlánc (2.24. ábra).



a) a szegmentálással kapott bináris bemeneti kép adatpontjai 1 m-es geometriai felbontású IKONOS űrfelvétel alapján



b) az 50 neuronból álló lánc kezdeti pozícióban

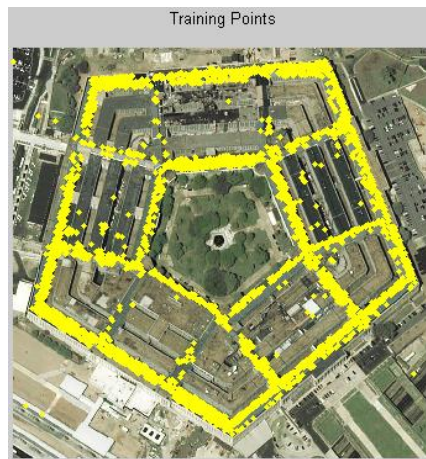


c) a SONG által végzett objektumdetektálás eredménye

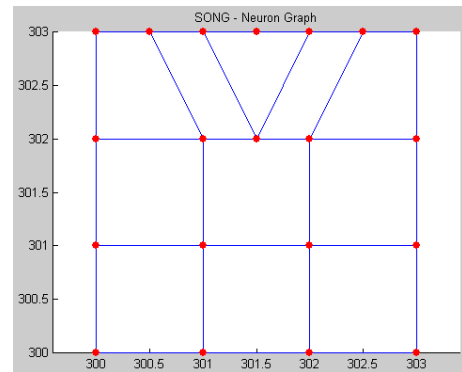
2.24. ábra: A SONG-módszer alkalmazása lineáris objektum (példánkban a velencei Canale Grande) detektálása során

A bonyolultabb alakzatok felismeréséhez előzetes objektumgráf hozható létre, majd az önszerveződés tulajdonságának köszönhetően a SONG-eljárás megtalálja annak tényleges helyét az objektumot alkotó képen. A Pentagon épületének vázát leíró gráf (2.25. b ábra) megadásán kívül az épületet ábrázoló nagyfelbontású űrfelvétel egyszerű szegmentálásával binárisra alakított képre van bemenetként szükség (2.25. a ábra). A neurongráf szerveződésének folyamata a 2.26. ábrán látható.





a) bemenő adatpontok 0.6 m geometriai felbontású Quickbird űrfelvétel binarizálása után

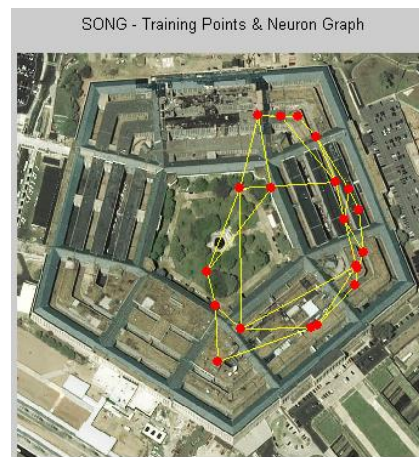


b) a kettős ötszög-épület egyszerűsített váza topológiaiailag korrekt gráfként

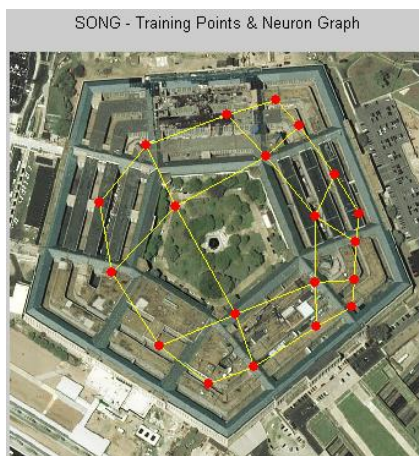
2.25. ábra: Összetett geometriájú objektum bemenő képe és kezdeti neurongráfja



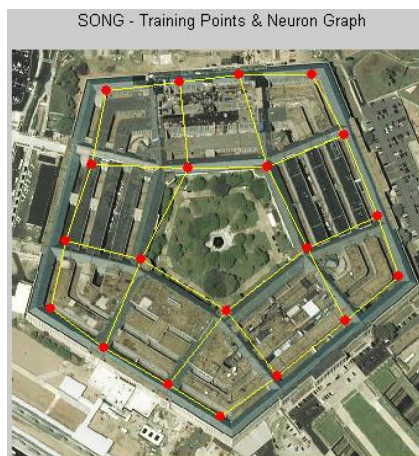
a) a neurongráf kezdeti pozicionálása (0. lépés)



b) a neurongráf a 3. ordering lépés után



c) a neurongráf a 10. ordering lépés után



d) a neurongráf végleges pozíciója (300. ordering és 10000 tuning lépés után)

2.26. ábra: A SONG önszerveződésének lépései a Washington-i Pentagon példáján keresztül

## 2.4 Következtetések, tézisek

A fejezetben bemutatam azokat a kutatási eredményeket és fejlesztéseket, amelyeket az úthálózati elemek térképezésének területén értem el, illetve hajtottam végre. A munka eredményeként egy tézist fogalmaztam meg, amely négy altézisből áll. A tézis a következő:

**Tézis 1:** Módszertant dolgoztam ki közúthálózat elemeinek detektálására és térképezésére képfeldolgozási és mesterséges intelligencia eszközök használatával.

Az altézisek a klasszikus képfeldolgozási és mesterséges intelligencia területére sorolt eljárások hatékony kombinációját fejezik ki, kiemelkedően a Hough- és Radon transzformációkat, a Levenberg-Marquard optimalizáció alkalmazásával tanított hibavisszaosztós előrecsatolt mesterséges neurális hálózatot, növekvő neurális gázt, genetikus algoritmust és az önszerveződő térképek (SOM) továbbfejlesztésével kidolgozott önszerveződő neurongráf (SONG) módszertant. Természetesen a munka a hagyományos értelemben vett képfeldolgozás szűrési, élkeresési, színmodell-transzformációs és más műveleteit intenzíven alkalmazza.



### 3 Az útpálya jellemzőinek mérése és térképezése

#### 3.1 Bevezetés

Az útburkolatok jellemzéséhez azok felületéről minőségi mérőszámokat kell megállapítani. Ezeknek a mérőszámoknak levezetéséhez különleges mérési eljárásokat és eszközöket alakítottak ki. A legfontosabb jellemzők és azok mérését szolgáló megoldások a következők (Kertész, 2011):

- **keresztirányú profil:** egyik leggyakoribb mérőműszere a profilográf, amely lehet kaliforniai vagy Rainhart-féle. Az eszköz egy keretre erősített keréksor, amellyel a burkolat profiljának magasságkülönbségei határozhatók meg a tervezett vagy ideális állapothoz képest. Igen gyakran a nyomvályúk kimutatására, azok mélységének megállapítására használják. Profilt lehetséges szintezéssel is meghatározni.
- **hosszirányú egyenetlenség:** az útpálya hosszirányában érzékelhető rendellenesség, amelyet mérőléccel (pl. 4 méteres léccel), huzalfeszítéssel, mozgóbázisú egyenetlenségmérővel vagy BUMP-integrátorral lehet megmérni.
- **burkolatfelület makroérdessége:** homokterítéses vagy vízkifolyásos módszerrel a keréknyomokban és más burkolati részekben elvégzett kis területre kiterjedő érdességmérése.
- **burkolatfelület csúszásellenállása:** Skid Resistance Tester (SRT) inga segítségével vagy ferde ke- reket tartalmazó Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM) mérőjárművel, esetleg blokkolt kerék SRM (Stuttgarter Reibungsmesser) módszerrel megmért felületi jellemző.
- **burkolatfelületi repedések:** vizuális helyszíni minősítéssel (pl. Roadmaster-rel) vagy fényképezéssel/videózással és annak kiértékelésével meghatározható jellemző.

Az újabb fejlesztésű burkolati mérőrendszerek általánosabbak, mivel a mobil térképezés berendezései szolgálják a fenti felsorolásban tárgyalt jellemzők meghatározását.

A mobil térképező rendszerek olyan műszeregyüttesek, amelyek mozgó platformon hordozzák az attribútumokat mérni képes szenzorrendszert és egy hely- és helyzetmeghatározó berendezést.

A mobil térképező rendszerek három említett komponense a következő lehet:

- **hordozó platform:** a felszíni közlekedés számára leglényegesebb a gépjárműves (autós) megoldás;
- **attribútum adatgyűjtő komponens:** tipikusan kamerák és lézerszkennerek együtteséből áll, amellyel az úttest és annak környéke képezhető le, majd tárolható;
- **hely- és helyzetmeghatározó komponens:** a gyakorlati megoldásokban a GNSS (*Global Navigation Satellite System*, vagyis globális navigációs műholdrendszer) és IMU eszközök, odométerek integrációjával kifejlesztett műszerelem.

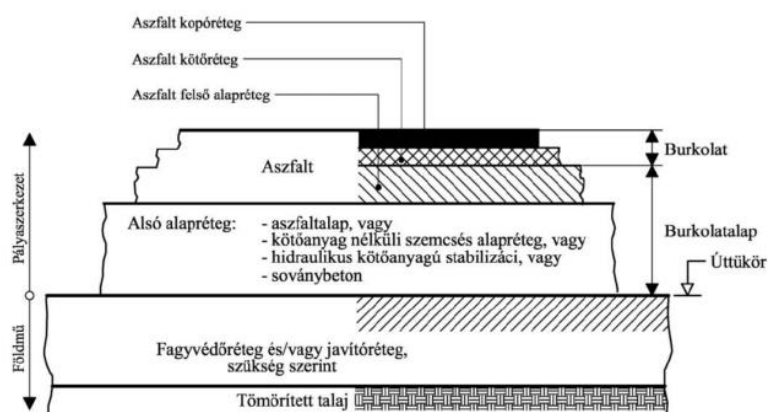
A mobil térképezés az infrastruktúra felmérésének radikálisan új módszerét jelenti, mivel a terepi adatgyűjtés nagy sebességgel, magas automatizáltsággal, alacsony szakmai kompetenciát igénylő működtetéssel történik meg, majd azt követően a feldolgozás során kell az irodában kiértékelni a méréseket, azaz előállítani a szükséges termékeket. A paradigmaváltásnak köszönhetően a mérési fázis jócskán lerövidült, a nagyobb adatmennyiség ellenére is gyorsabbá vált a terepi és elhúzódnóbbá az irodai munka. Az irodai feladat automatizálásának igénye sokszor a felmérési eszközök vagy módszerek fejlesztését is igényli.

Már 1995-ben elkészült a The Ohio State University (OSU) fejlesztése, a GPSvan, ami a GPS és *dead reckoning* megoldás ötvöztetésével a helymeghatározást, valamint kamerákkal az útkörnyezet felmérését végezte (Toth, 1995; Bossler & Toth, 1996). A jármű a mobil térképezés egyik első működő eszközének tekinthető.

Magyarországon eleinte csak a svéd Ranboll által fejlesztett *Road Surface Tester* (RST) rendszert ismerték, mivel több évben is az ország főbb útjainak állapotfelmérését végezte. Az RST az út egyenetlenségeit, hossz- és keresztirányú lejtését, valamint felületi paramétereket határozott meg magas mérési sebesség (akár 50-80 km/h) mellett. A jármű elején elhelyezett mérőgerenda lézerekamerái mérték fel a burkolat felületét 11 pontban, néhány kHz-es frekvenciával, majd a számítások lefuttatásával állították elő a keresztirányú és felületi jellemzőket. A berendezés dőlésmérőt is használt és természetesen támaszkodott a GPS-re.

Az utak pályaszerkezetének feladata, hogy a több alkotó rétegen keresztül a járművek kerekei által közvetített terhelést eloszassák és lecsökkentve átadják a földműnek (Tóth, 2017a). A pályaszerkezet kialakításakor a felhasznált anyagok minősége a földműtől felfelé egyre javul és vékonyodik. A pályaszerkezettel kapcsolatos mérnöki tevékenységek felölelik a méretezést, a tervezést és a megerősítést. A forgalom nagysága, a klíma adottságai mellett az utak tartósságának kulcsa a felhasznált anyagokban rejlik. A kötőanyag minőségén és mennyiségén kívül az adalékanyag minősége és a beépítéskor, és az üzemeltetésekor jelen lévő szabad hézag határozza meg a pálya szerkezeti geometriáját, ezen túlmenően a szilárdsági és tartóssági jellemzőit.

A pályaszerkezet rétegei lehetnek a földmű, a kötőanyag nélküli szemcsés réteg, a kötőanyaggal kezelt réteg és a bitumenes réteg. Az egyes rétegek továbbá egymással is kölcsönhatásba kerülnek, ami lehet közöttük tapadás, részleges tapadás vagy egymáson történő elcsúszás (Tóth, 2017b).



3.1. ábra: Az útpályaszerkezet felépítése az egyes rétegekkel (Lublóy *et al.*, 2014)

A megépült útpályaszerkezetek vizsgálata során jellemzően 150 mm átmérőjű henger alakú fúrt magmintát vesznek és azt elemzik. A magminták hagyományos vizsgálati módszere a vizuális minősítés, mely során tapasztalt szakemberek állapítják meg a zúzottkő méretét, eloszlását, az adalékanyag mennyiségét és a szabad hézag mértékét a minta felszínén. Alaposabb vizsgálat esetén a mintát hossz- és keresztirányban elfűrészelik és további hasonló elemzést végeznek. Hasonlóképpen csiszolatok készítése is lehetséges hagyományos eljárás.

A laboratóriumi számszerűsíthető mennyiségek megállapításához az optikai vizsgálatokon túl kémiai technológiákkal (savakkal, oldószerekkel stb.) komponensekre bontják a magmintát, majd megméri azok tömegét és térfogatát, s következtetnek a hiányzó (hézagtérfogat) adataira. Az eljárás meglehetősen hosszadalmas, vegyszerigényes és pontatlan. További hátrány, hogy csak a magminta egészéről képes adatot szolgáltatni, a lokális paraméterek változásáról (például a mintán belüli szemeloszlásról) nem nyújt információt. A hézagtérfogat megállapítására további eljárások ismertek (Lublóy *et al.*, 2015).



### 3.2 Az útpálya felületi jellemzőinek meghatározási módjai

#### 3.2.1 Sztereofotogrammetriai mérési módszer burkolati jellemzők levezetésére

A főváros úthálózatának korábbi üzemeltetője, a Fővárosi Közterületfenntartó Részvénytársaság látva az RST bérlésének költségeit, valamint a saját fenntartási gyakorlatában a kátyúk javítására fordított összegeket, 2004-ben kísérleti fejlesztéssel bízta meg a Fotogrammetria és Térinformatika, valamint az Út- és Vasútépítési Tanszéket. Ennek a megvalósíthatósági tanulmánynak az elkészítése egy önálló fejlesztésű mobil térképező rendszer megalkotását jelentette (Barsi, Fi, Mélykúti & Lovas, 2005; T. Lovas *et al.*, 2007; Kertész, Lovas & Barsi, 2008; Lovas, Kertész, *et al.*, 2008).

A fejlesztett berendezés alapelve a fotogrammetriai előmetszéses pontmeghatározási technika. Lényegének megértéséhez a fotogrammetria alapösszefüggésére van szükség, amely leírja, hogy a képalkotáskor megtörténő vetítés alatt a tárgypont, a leképező eszköz (kamera) objektívének vetítési centruma és a leképzett kép pont egy egyenesen helyezkedik el. Ez az ún. kollinearitási egyenlet a következő:

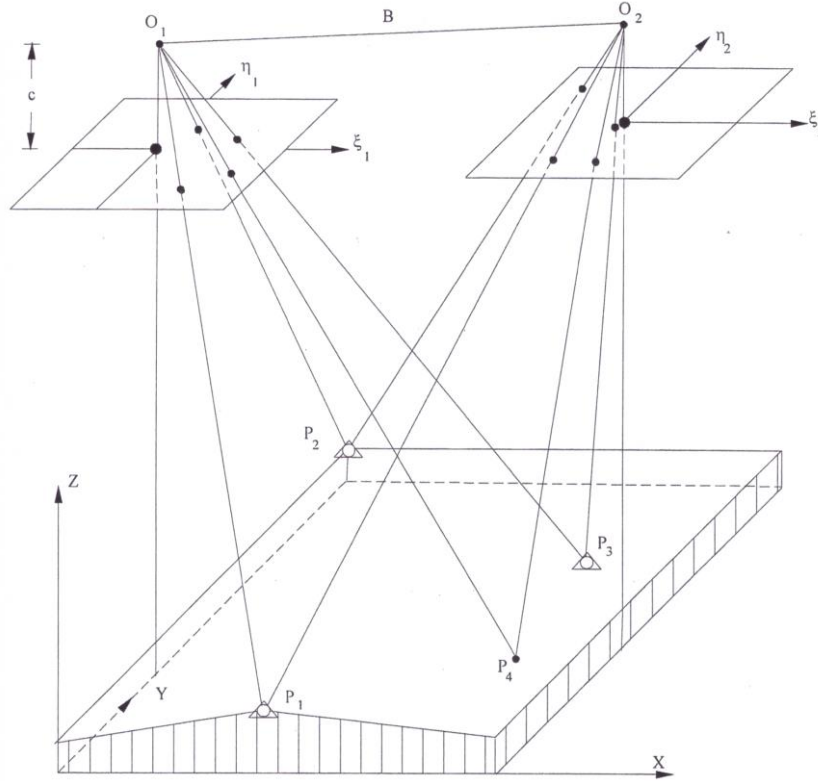
$$\begin{aligned}\xi &= \xi_0 - c \frac{\eta_1(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{\eta_3(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = f_\xi(\xi_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, X, Y, Z) \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{\eta_2(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{\eta_3(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = f_\eta(\eta_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, X, Y, Z)\end{aligned}\quad (16)$$

ahol  $X, Y, Z$  a tárgypont térbeli koordinátái,  $X_0, Y_0, Z_0$  a vetítési centrum térbeli koordinátái,  $c$  a kameraállandó,  $\xi, \eta$  a képpont képsíkbeli koordinátái,  $\xi_0, \eta_0$  a vetítési centrum képsíkbeli vetületének, a főpontnak a koordinátái és az egyenletben szereplő  $r_{ij}$  értékek a  $3 \times 3$ -as forgatási mátrix elemei. A forgatási mátrix tartalmazza a koordináta tengelyek körüli ún. Euler-féle forgatási szögeket, mégpedig az egyik leggyakrabban alkalmazott forgatási sorrendben ( $\omega\varphi\kappa$ ) az alábbiak szerint

$$\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} = \begin{bmatrix} c_\varphi c_\kappa & -c_\varphi s_\kappa & s_\varphi \\ c_\omega s_\kappa + s_\omega s_\varphi c_\kappa & c_\omega c_\kappa - s_\omega s_\varphi s_\kappa & -s_\omega c_\varphi \\ s_\omega s_\kappa - c_\omega s_\varphi c_\kappa & s_\omega c_\kappa + c_\omega s_\varphi s_\kappa & c_\omega c_\varphi \end{bmatrix}\quad (17)$$

Az iménti mátrixban a tömörebb jelölés szerint  $c$  jelenti a  $\cos(x)$ ,  $s$  pedig  $\sin(x)$  függvényeket, az alsó index pedig a trigonometriai függvény argumentumát jelzi.

Amennyiben egy kamera esetében kalibrációval meghatározzuk a belső tájékozás paramétereit, vagyis  $\xi_0, \eta_0$  és  $c$  értékét, továbbá olyan pontokat használunk fel, amelyeknek a képkoordinátáit megmérjük, tárgykoordinátáit pedig ismerjük (illesztőpontok), kiszámíthatjuk a külső tájékozási elemeket. Utóbbiakhoz tartozik  $X_0, Y_0, Z_0$ , valamint a három forgatási szög. A külső és belső tájékozási elemekkel rendelkező képeket tájékozottnak nevezzük. Tájékozott képeken minden képponthez egy térbeli vetítési sugár rendelhető és írható le annak függvénye. Ha két tájékozott képből álló párunk van, amelyek ugyanazt a tárgyat képezték le, de nem azonos vetítési centrumból, s nem azonos kamerával, akkor minden tárgyponthez két vetítősugár rendelhető, amelyek a tárgypontban metszik egymást (3.2. ábra).



3.2. ábra: Két kép ismert ( $P_1, P_2, P_3$ ) és ismeretlen ( $P_4$ ) tárgypontok leképezésével, valamint a képi és a tárgypontok koordináta rendszerekkel (Kraus & Waldhäusl, 1998)

Így az előmetszésnek nevezett megoldáshoz mindkét képhez felírhatók a (16) egyenlet összefüggései, mégpedig az eltérő tájékozási elemek miatt négy egyenletet:

$$\begin{aligned}
 \xi' &= f_{\xi}(\xi'_0, c', X'_0, Y'_0, Z'_0, \omega', \varphi', \kappa', X, Y, Z) \\
 \eta' &= f_{\eta}(\eta'_0, c', X'_0, Y'_0, Z'_0, \omega', \varphi', \kappa', X, Y, Z) \\
 \xi'' &= f_{\xi}(\xi''_0, c'', X''_0, Y''_0, Z''_0, \omega'', \varphi'', \kappa'', X, Y, Z) \\
 \eta'' &= f_{\eta}(\eta''_0, c'', X''_0, Y''_0, Z''_0, \omega'', \varphi'', \kappa'', X, Y, Z)
 \end{aligned} \tag{18}$$

Az egyenletrendszerben egy vesszővel az első, két vesszővel a második képet jelöltem. A tárgypontok ismeretlen térbeli koordinátái mindegyik egyenletben szerepelnek, így a túlhatározott egyenletrendszer megoldására például a legkisebb négyzetek módszere lehet alkalmas. Igaz ugyan, hogy a legkisebb négyzetek módszere érzékeny a durva hibás mérési eredményekre, s helyette a gyakorlatban szívesen választják valamelyik robusztus megoldást, a kezdeti rendszerben tapasztalt legkisebb négyzetes hatásfok miatt nem volt indokolt robusztus eljárást implementálni.

A burkolatmérő mobil térképező rendszerben ennek az alapgondolatnak a megvalósításához két kamerára van szükség a képpár előállításához. A tájékozási elemek meghatározására egyrészt végezni kell egy kalibrációt, hogy a belső tájékozási elemek ismertek legyenek és olyan mérőműszerekre van szükség, amelyek a külső tájékozás elemeit mindkét kamerára szolgáltatni tudják. Összesen 12 tájékozási elem meghatározására van szükség (két kamera esetében 3 eltolás és 3 forgatási szög).

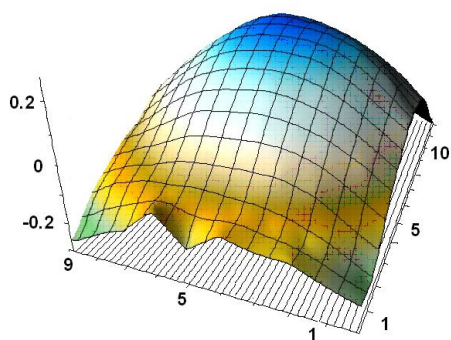
A szakirodalomból (pl. (Kraus & Waldhäusl, 1998; McGlone, Mikhail & Bethel, 2004)) ismert megoldás, hogy két kamerát merev összeépítéssel rögzíteni lehet, így a térbeli mozgásukat (hely- és helyzetváltozásait) egymáshoz viszonyított módon kényszerfeltételekkel és a kamerapárra vonatkozó műszerekkel adhatjuk

meg. Ezt követve a két kamerát merev „mérőhídra” erősítettük, amelyhez GPS és IMU műszereket is rögzítettünk. A kamerák közötti kényszereket a relatív tájékozásnak nevezett eljárással biztosítottuk (Kraus & Waldhäusl, 1998), így 6 paraméter megköthető. A hiányzó 6 paraméter a mérőhíd térbeli helye (3 eltolás) és helyzete (3 forgatási szög). A helymeghatározásra a GPS jó megoldást jelent, a forgatási szögeket az inerciális berendezésből kaphatjuk meg.

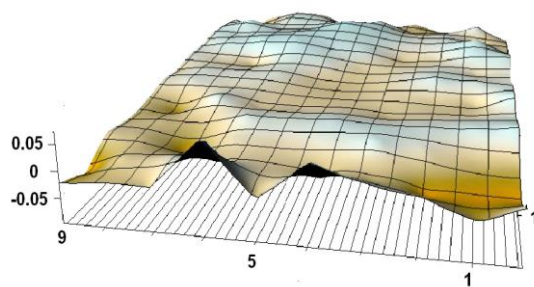
Az alkalmazott digitális kamerákat kalibrációnak vetettük alá. A kalibráció során a használt ImagingSource DFK-41F02 típusú színes kamerapárjával  $150 \times 90$  cm nagyságú szabályos  $2 \times 2$  cm négyzetekből álló sakk-tábla-mintázatot fényképeztünk le különböző szögekből. A kamera  $1280 \times 960$  pixel képmérettel rendelkezik, a pixelméret  $4.8 \mu\text{m}$ . A kameratesthez 9 mm fókusz-távolságú Pentax Cosmocar objektív csatlakozik. A kalibrációhoz 120 négyzet sarkainak automatikus meghatározására fejlesztett mérőalkalmazást, majd BINGO sugárnyaláb-kiegyenlítő szoftverrel elvégeztük a kamerakalibrációt. A számítás eredményeként a 3.1. táblázatban látható numerikus jellemzőket és a 3.3. ábrán látható elrajzolási felületet kaptuk. A kalibrált jellemzők segítségével a burkolatmérő megoldásunk képessé vált az elvárható legjobb geometriai pontosság elérésére. Kalibrációnkat a gépészeti gyakorlatban használt Opton koordinátamérő műszerrel hitelesített térbeli kalibrációs mezőn validáltuk (Tóth, Mélykúti & Barsi, 2005).

3.1. táblázat: A digitális videokamerák kalibrációs eredményei (hitelesített belső tájékozási adatok 100 pixel egységben)

	1. kamera	2. kamera
$\epsilon$	$9.4418 \pm 0.0317$	$9.3442 \pm 0.0412$
$\xi_0$	$-0.0929 \pm 0.014$	$0.2268 \pm 0.018$
$\eta_0$	$0.0863 \pm 0.019$	$0.1288 \pm 0.023$



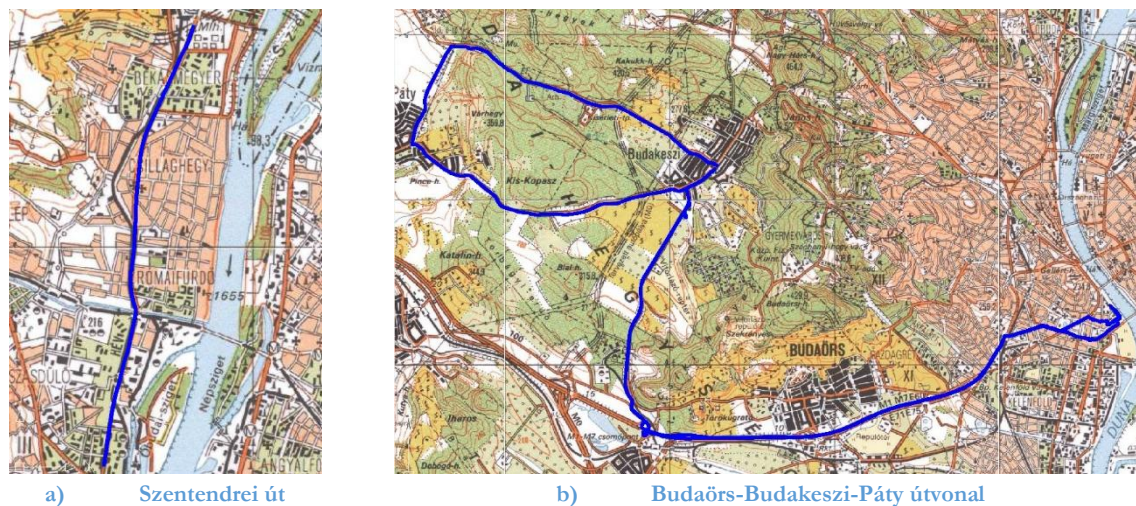
a) a kalibráció előtti elrajzolás-felület



b) a kalibrációval bevezetett járulékos paraméterek csökkentésével kapott elrajzolás-felület

3.3. ábra: Az 1. kamera elrajzolás-felülete a kalibráció előtt és után

A kiegészítő eszközök közé sorolt IMU-k korábban meglehetősen drága műszerek voltak, legalábbis a nagypontosságú, gyors változataik, így az elektronikai fejlesztés jelentős erőket koncentrált új, olcsó szenzorok előállítására. A mikroelektromechanikai elvekre épülő érzékelők (*micro-electro-mechanical systems* – MEMS) forradalmasították az egész navigációs iparágat, az olcsó szenzorok bárki számára elérhetőek lettek. Nagy lehetőségnek tűnt számunkra, hogy ilyen érzékelő felhasználásával használható segédeszközre tehetünk szert. Munkánkban ezért több MEMS-típusú IMU vizsgálatát végeztük el. Crossbow NAV420 CA GPS-vevőt és IMU-berendezést, valamint Crossbow AHRS400CB típusú IMU-egységet helyeztünk el személyautón (3.5. ábra), majd azokkal bel- és külterületen (3.4. ábra) méréseket végeztünk (Kertész & Barsi, 2007).

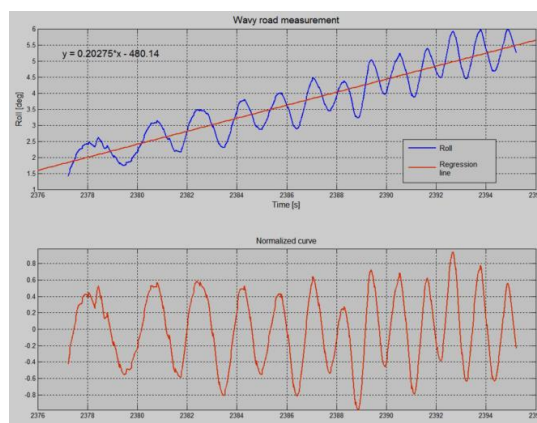


3.4. ábra: Bel- és külterületi GPS/IMU mérési helyszínek

Előbbi műszer (NAV420) integráltan tartalmazott GPS és IMU egységeket és használatával jó helymeghatározást lehet végezni. A második műszer (AHR400) csak IMU-ként inerciális észlelések rögzítésére alkalmas. A két műszer méréseinek egyesítéséhez saját Kálmán-szűrőt fejlesztettünk (Kertész & Barsi, 2011). A mérések feldolgozásában a legérdekesebb eredménynek azonban nem a helymeghatározás bizonyult, hanem az, hogy az inerciális berendezésbe épített gyorsulásmérők és giroszkópok észlelései korrelálnak az út magassági vonalvezetésével, sőt a burkolat anyagával is. A magassági vonalvezetésben legszembetűnőbb példaként hullámos útfelületet lehet bemutatni, aminek nyers és trend-mentesített mérései a 3.5. b ábrán láthatók (Barsi, Lovas & Kertész, 2006).



a) Crossbow NAV420CA és AHR400CB típusú inerciális mérőegység együttese autóba szerelve

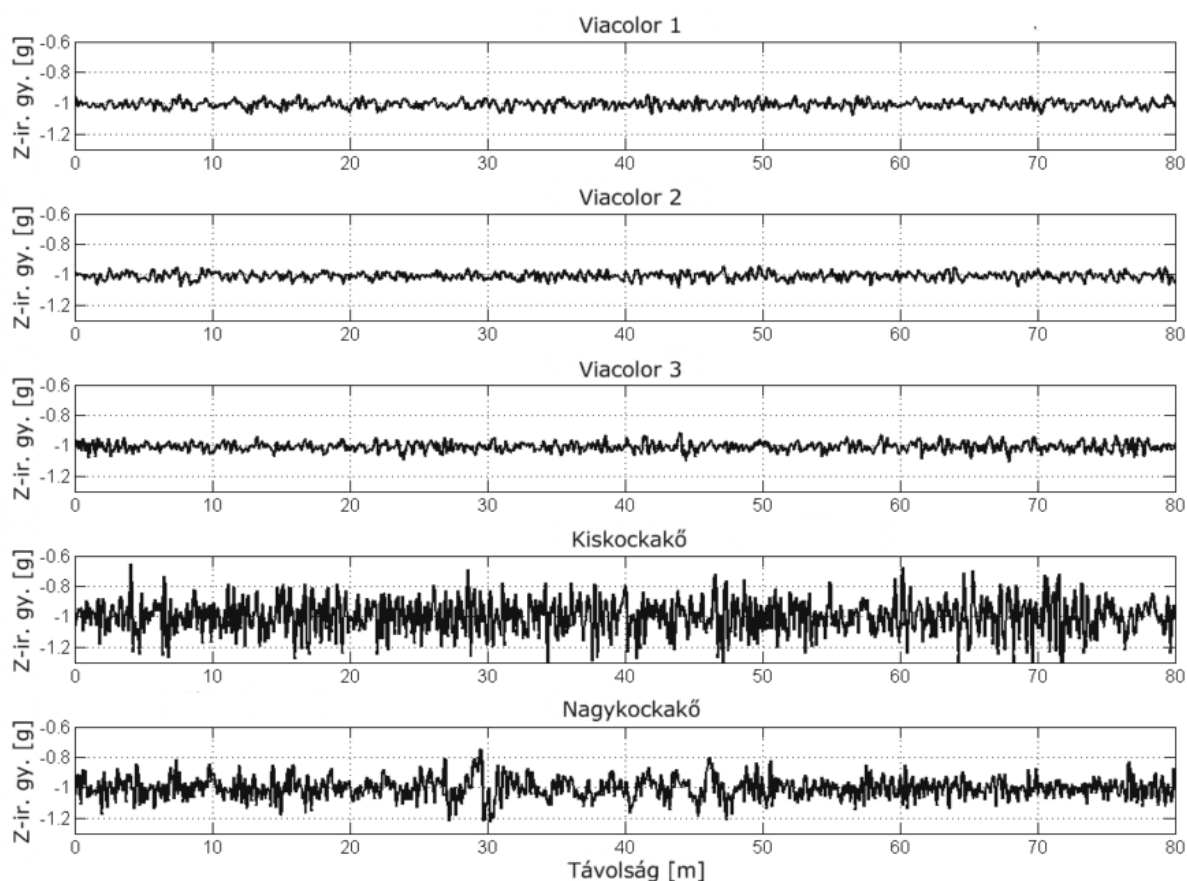


b) a navigációs felhasználás mellett az úthullámmosság kimutatása is lehetséges a trend eltávolítása után

3.5. ábra: Inerciális mérőegység vizsgálata (Barsi, Lovas &amp; Kertész, 2006)

Az IMU-egység által szolgáltatott mérések közül a függőleges (Z) irányú gyorsuláskomponens a különféle burkolattípusok esetén egyedi képet mutatott (3.6. ábra), így ennek a mérésnek a felhasználásával tulajdonképpen az útfelület burkolási anyagára lehet következtetni. A mérések állandó 30 km/h-s sebesség mellett történtek.

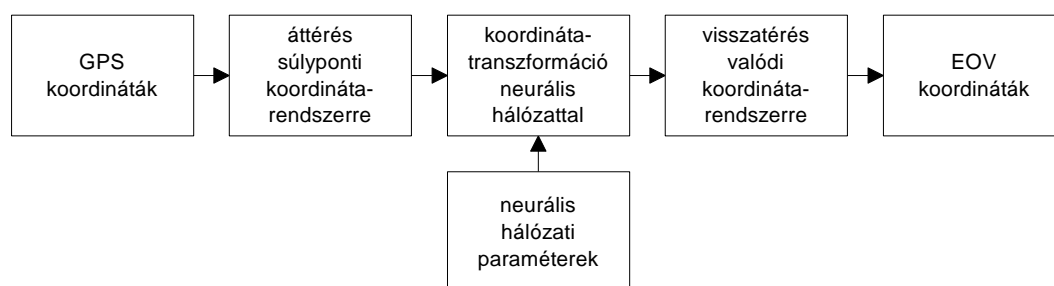




3.6. ábra: Inerciális mérések (Z-irányú gyorsulások) összehasonlítása különböző burkolattípus esetén

Annak érdekében, hogy az IMU-méréseket (vagy a további járműfedélzeti méréseket) térképen lehessen ábrázolni, a nyers WGS84 vonatkozási rendszerben kapott pozíciókat vetületi koordináta rendszerbe kell átszámítani. Magyarországon a használt Egységes Országos Vetületi (EOV) rendszerben készült térképekhez ezért a WGS84-ből erre a rendszerre kell átszámítani a pozíciókat. Mivel a két rendszer között zárt matematikai összefüggés nem írható fel az eltérő alapfelületek és különböző vetítési szabályok miatt, ezért a geodéziai gyakorlatban szokásos közös pontokra támaszkodó megoldást kell használni.

Két koordináta rendszer közötti transzformáció, általában leképezés megoldható neurális hálózat segítségével is. A Neutra néven kifejlesztett eljárásomban a következő folyamatábra szerint végzem a számításokat (3.7. ábra):



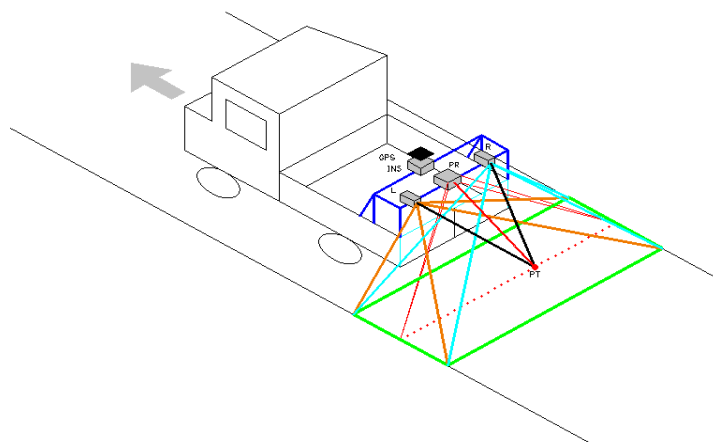
3.7. ábra: A neurális számításon alapuló koordináta transzformáció folyamatábrája WGS84 és EOV rendszerek között

A megoldás magját alkotó mesterséges neurális hálózat a következő radiális bázisú összefüggés szerint szolgáltatja az eredményt:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}_2 \cdot \exp\left(-\left[\mathbf{b}_1 \cdot \|\mathbf{W}_1 - \mathbf{x}\|^2\right]\right) + \mathbf{b}_2 \quad (19)$$

ahol  $\mathbf{x}$  a WGS84-bemenet,  $\mathbf{y}$  az EOVS-kimenet 3-dimenziós vektora,  $\mathbf{W}_1$  és  $\mathbf{W}_2$  a neurális hálózat súlymátrixai az első illetve a második rétegen,  $\mathbf{b}_1$  és  $\mathbf{b}_2$  a két réteg torzításai (bias-vektorai). A hálózat első rétege 22 neuront, második rétege 3 neuront tartalmaz. A tanításhoz 180, a teszteléshez 90 mindkét rendszerbeli koordinátákkal rendelkező közös pont állt rendelkezésre, amelyeket a magyar GPSH hálózatban mértek meg. A tanításhoz Levenberg-Marquard eljárást alkalmaztam. A tesztelés kimutatta, hogy a neurális hálózat 0.050 és 0.061 m átlagos pontosságra képes  $x$  és  $y$  síkrajzi értelemben, és 0.129 m átlagos magassági pontosságot hoz. A teljes tesztemzőn a maximális térbeli eltérés nem haladja meg a 0.394 m eltérést, ami a topográfiai feladatok számára elegendő pontosságot jelent. Az implementált szoftver pontonkénti és köteget feldolgozásra is alkalmas; a kényelmes használathoz Matlab és C++ nyelveken grafikus felhasználói felületet készítettem (Barsi, 1999, 2001).

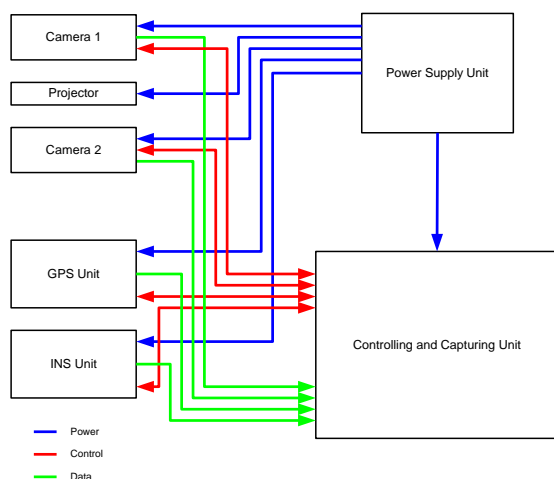
Az útfelület a kamerák képein meglehetősen homogén módon képződik le, ezért ugyanannak a felületi pontnak a képkoordinátáit megmérni (azaz a pontot mindkét képen egyértelműen azonosítani) nehéz feladat. Ennek megkönnyítésére lézeres projektorsorral pontokat vetítünk a burkolatra (3.8. ábra), összetartozó azonosításuk mindkét képen szoftvereszközökkel megoldható.



3.8. ábra: Az útburkolati felmérő rendszer elvi sémája a kamerákkal, GPS és INS egységgel, valamint a lézerprojektorokkal

A vezérléssel, adatrögzítéssel és tápellátással kiegészített rendszervázlat és annak megépített járműves berendezése a 3.9. ábrán látható. Az eszközt a *Photogrammetric Road Measurement System* angol rövidítésével PHORMS-nak neveztük el.

A fotogrammetriai alapelv felhasználásán túl képfeldolgozási fejlesztésre is szükség volt. Ezt a lézermarkerek által megjelölt burkolati pontok automatikus detektálása és az azt követő feldolgozás igényelte. Ennek érdekében így a leképződött képeken automatikus pontdetektálási eljárást fejlesztettünk, amely több alap- és összetett művelet együtteseként szolgáltatta a pontok képkoordinátáit mind a bal, mind a jobb képeken. A felhasznált műveletek többek között a küszöbölés, Hough-transzformáció, morfológiai eljárások, valamint illesztési műveletek voltak (Kertész, Lovas & Barsi, 2008; Tóth, 2009).



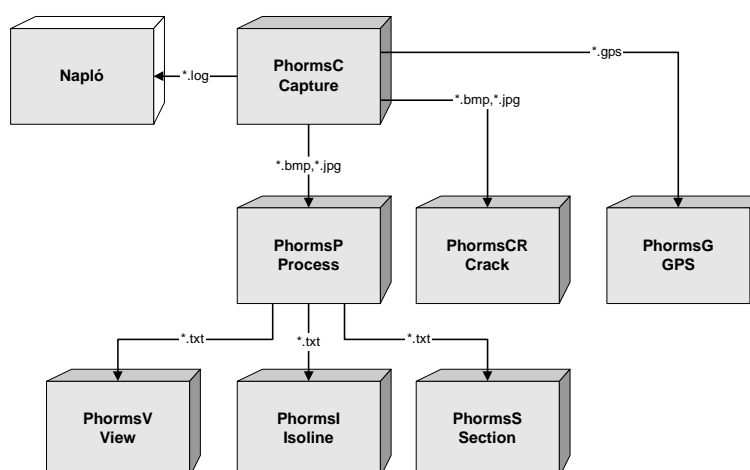
a) a PHORMS sematikus rendszerterve



b) a PHORMS járműre felszerelt műszergyűjtőként

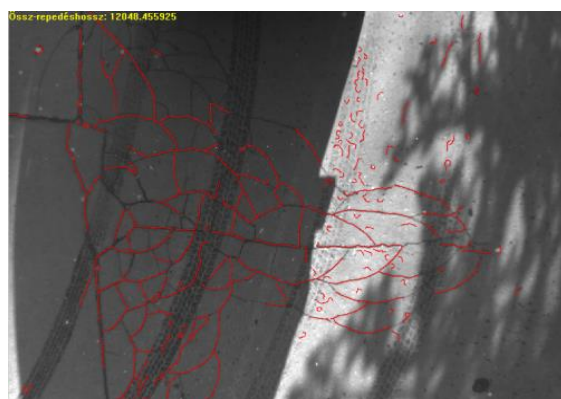
3.9. ábra: A PHORMS burkolatfelmérő mobil térképező rendszer sémája és megvalósított járműves környezete

A több szoftverkomponensből álló fejlesztés sémája a 3.10. ábrán látható. A komponensek tanulmányozásával megállapítható, hogy három főbb irány mentén történik a gyűjtött adatok feldolgozása. Ezek a repedés-kiértékelés, a GPS-trajektória és a burkolati feldolgozás, ami tulajdonképpen a felületi jellemzők megállapítása és megjelenítése. Utóbbi perspektív látványként, metszetekkel, izovonalas módon vagy magasság szerinti színezéssel, gradiensekkel kiegészítve történhet (3.11. ábra). A gyakorlati használat érdekében jelentések készültek a felmért szakaszokról, amely dokumentumok tartalmazzák a mérés és feldolgozás körülményeit valamint eredményeit. Az eredmények közül kiemelendő az útszakasz egyenetlenségét mutató nemzetközi index (*International Roughness Index* – IRI) alapján készített Burkolati Egyenetlenségi Index (BEI). A BEI gyakorlati jelentése teljes mértékben megegyezik az IRI-éval, azonban a hosszadalmas hivatalos kalibrációs folyamat elmaradása miatt nem kívántuk az azonos megnevezést alkalmazni.

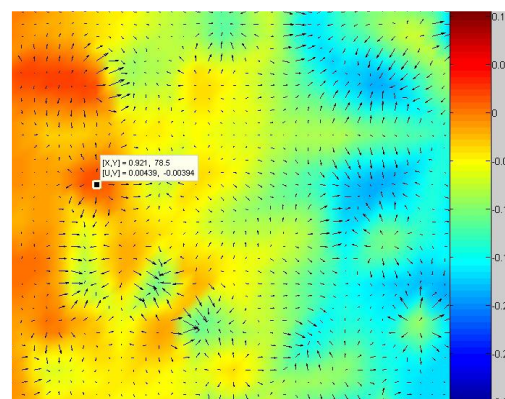


3.10. ábra: A PHORMS rendszer szoftverkomponensei és a közöttük zajló kommunikáció formátumai

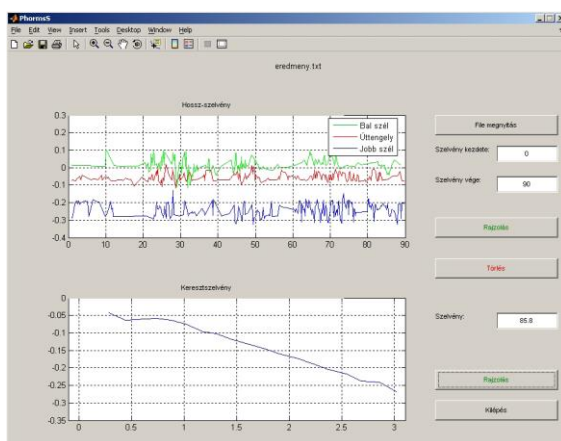
A 3.11. ábrán a PHORMS megjelenítési módjai láthatók.



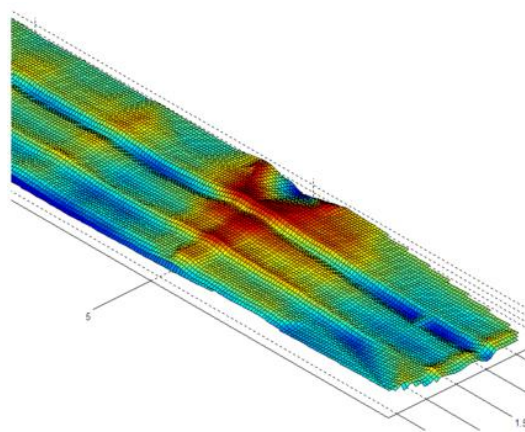
a) repedéskép



b) magasság szerinti színezés és gradiens-kép



c) hossz- és keresztmetszet



d) perspektív megjelenítés magasságszínezéssel

3.11. ábra: A PHORMS rendszer néhány grafikus eredménye

A statisztikai adatokat is tartalmazó jelentés (3.12. ábra) nem csupán a munka dokumentálása a felmérési szakaszokról, hanem egyúttal adatnyerési lehetőség vezetői információk gyűjtéséhez is. Így a jelentés alapján

- a fejlesztők megvizsgálhatták, hogy milyen eredményességgel működtek az egyes algoritmusok a különböző üzemeltetési körülmények között;
- az útfelmérők megnézhették, hogy mekkora hatékonysággal történnek a mérések, mennyire gyorsan halad a munka;
- az útüzemeltetés megállapíthatta, hogy milyen mértékű az utak egyenetlensége a város egészében (ehhez kiváló mintát mutat a 3.13. ábra, amelyen a főváros teljes úthálózatában a 2011-ig felmért és minőségi osztályozással ellátott szakaszok láthatók). A többidőpontú mérés az egyes utak leromlási folyamatáról adhat képet.



```

*****
*PHORMS® 1.0 útburkolat felmérő rendszer*
*****
*Fejlesztette: BME Fotogrammetria és Térinformatika Tsz. 2008.*
*****

A projekt neve: Meres000336
A felmérés kezdete: 2008.04.05. 23:32:04
A felmérés vége: 2008.04.06. 00:00:19
A felmérés időtartama: 00:28:14
A felmérés helye: Űrs
A profilok kiszámításának időpontja: 2008.04.06. 00:26:19
Az BEI értékek kiszámításának időpontja: 2008.04.15. 14:39:57

A jármű állóhelyzetben: 00:02:30
A felmérés alatt megtett út hossza: 7904,759 m (vízszintes távolság), 7921,431 m (térbeli távolság)
A felmérés átlagsebessége: 16,8 km/h
Mért profilok száma: 8402 db
BEI számításhoz felhasznált profilok száma: 6014 db (71,58 %)

A mért szakasz minimális BEI értéke: 0,486 m/km
maximális BEI értéke: 54,990 m/km
átlagos BEI értéke: 10,003 m/km
BEI értékeinek szórása: 7,513 m/km

Bal keréknym alatti minimális BEI érték: 0,480 m/km
maximális BEI érték: 60,953 m/km
átlagos BEI érték: 10,443 m/km
BEI értékeinek szórás: 7,626 m/km

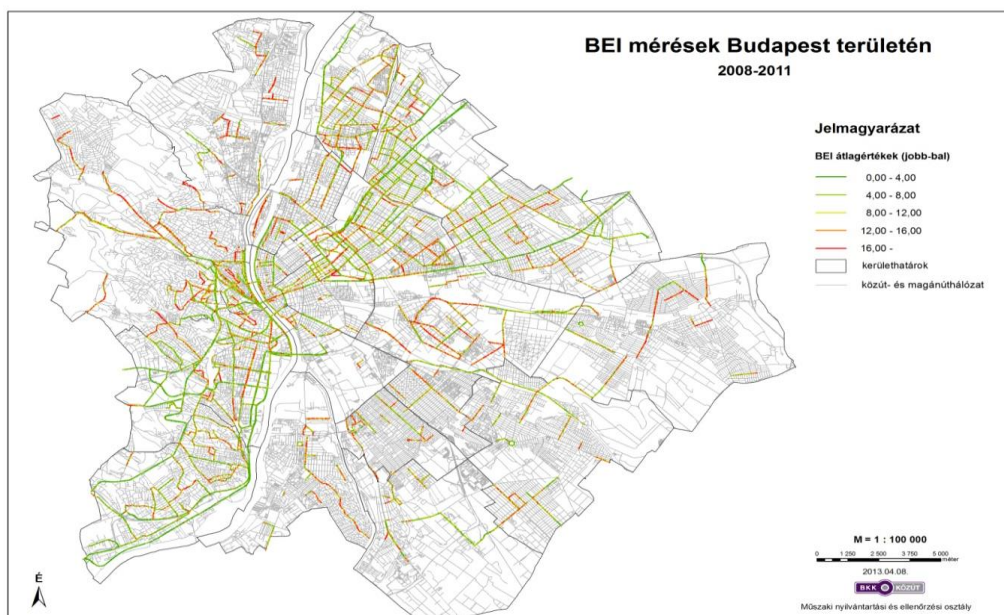
Jobb keréknym alatti minimális BEI érték: 0,000 m/km
maximális BEI érték: 55,233 m/km
átlagos BEI érték: 9,563 m/km
BEI értékeinek szórás: 7,683 m/km

A felmért szakasz kategorizálása:
1. kategória (BEI: 0-4 m/km): 1340,160 m
2. kategória (BEI: 4-8 m/km): 1797,856 m
3. kategória (BEI: 8-12 m/km): 1269,910 m
4. kategória (BEI: 12-16 m/km): 737,284 m
5. kategória (BEI: >16 m/km): 1143,717 m
6. kategória (BEI érték nincs): 1615,832 m

A felmért szakaszon belüli hibás (5. kategóriás) helyek adatai:
Sorszám Eleje EOV_y Eleje EOV_x Uéje EOV_y Uéje EOV_x Táv BEI
1. 656865,960 239962,695 656861,042 239961,877 4,986 26,324
2. 656706,991 239939,132 656696,860 239937,342 10,288 17,132

```

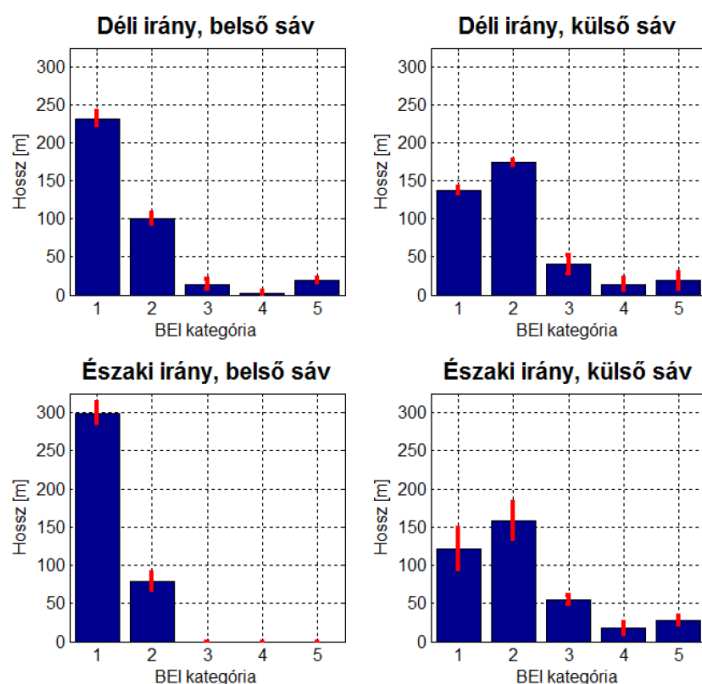
3.12. ábra: A PHORMS rendszer automatikusan készülő szöveges jelentése



3.13. ábra: A PHORMS rendszer használata során felmért budapesti útszakaszok és azok minősítése (a jogutódként BKK Közút által üzemeltetett rendszerből)

A fővárosi mérések kapcsán érdemes elmondani, hogy 2008 és 2010 között 805 felmérési szakasszal mintegy 791 km budapesti utat mértek fel. A mérés kilométerenként több mint 1000 profilt állított elő. Az egyenletlenség értékeire 5 BEI kategória szolgált, amelyhez hozzáadódott még egy hibás/zavart kategória, ahol a mérések nem voltak garantálhatóan eredményesek, például GPS-jelkiesés miatt.

A rendszer hitelesnek minősülő működéséhez kalibrációs vizsgálatokat végeztünk. Ezek a vizsgálatok a kamerarendszer leképezésére, a GPS helymeghatározó képességére, az inerciális szenzorok érzékenységére irányultak. A magasságértékek mint legfontosabb validálandó mennyiség tesztelésére 10.5 cm oldalhosszúságú betonkockákat helyeztünk el az úton különböző helyeken, majd a burkolathoz képest tapasztalt magasságokat határoztuk meg. A vizsgálat igazolta, hogy minden mért érték cm élességgel elfogadható (Kertész, 2011). Végeztünk ismétlésvizsgálatot többszöri áthaladással ugyanazon az útszakaszon a BEI-értékek meghatározásának megbízhatósági vizsgálata érdekében. A 3.14. ábrán látható, hogy a lehetséges 5 BEI kategória besorolásai szerint milyen hosszú szakaszok találhatók a tesztúton, továbbá mennyi a szakaszszélességek szórása. A legnagyobb eltérés (26.4 m hossz-szórás) az északi irányba tartó külső sáv 1-es BEI kategóriájánál volt tapasztalható, egyébként átlagosan a mért szakaszon 4-5 m-re egyeztek a besorolt kategóriák szakaszszélességei (Kertész, 2011).

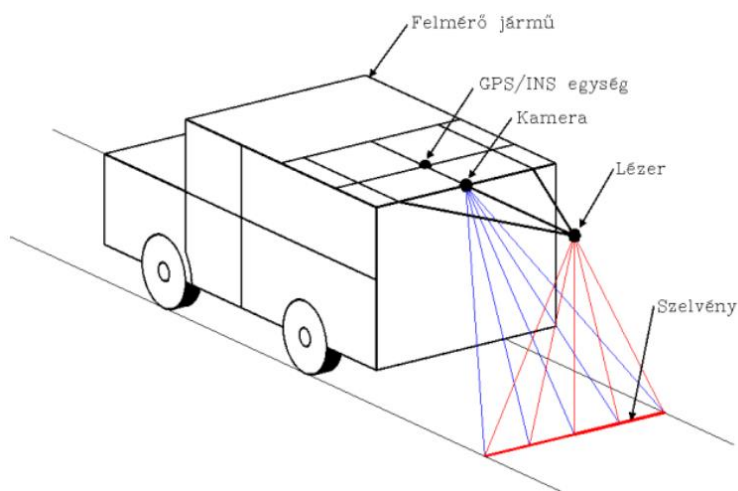


3.14. ábra: Ismétléses vizsgálatok a BEI-érték meghatározására a budapesti Pázmány Péter sétányon

### 3.2.2 Monokamerás felmérőrendszer

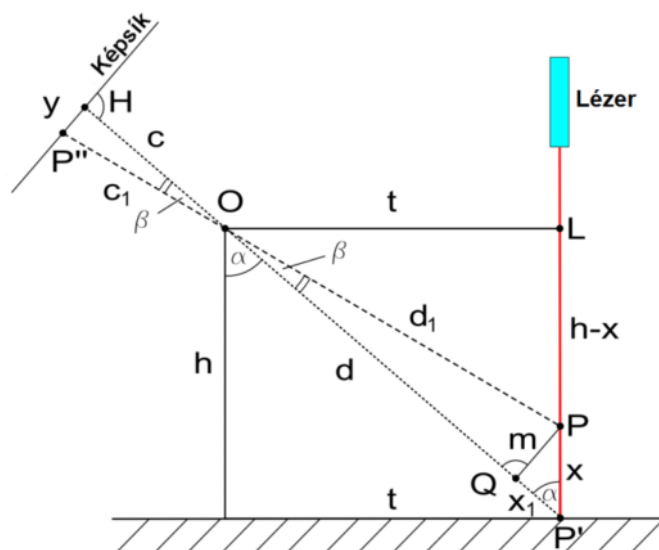
A PHORMS fejlesztése során különösen sok probléma merült fel a gyakorlatban a képzetlen felhasználók miatt. Főként ez adta a legfőbb motivációt arra, hogy továbbgondoljuk a PHORMS koncepcióját és minél egyszerűbbé, kompaktabbá tegyük. Ennek a gondolkodásnak az eredményeként dolgoztuk ki a monokamerás változatot, amit PHORMS2-nek nevezünk.

A monokamerás rendszer alapvetően eltérő koncepciót alkalmaz. A 3.15. ábrán látható, hogy a továbbfejlesztett változat már csak egyetlen kamerát tartalmaz (szemben a sztereokamerás megoldással).



3.15. ábra: A PHORMS2 rendszer egyszerűbb megoldása a mérőjárművel (vö. 3.8. ábra)

Ennek a koncepciónak a matematikai alapját a 3.16. ábra alapján lehet megérteni. A függőlegesen vetített lézer a burkolat függőleges síkjában mozog a felmérő jármű haladása során, a ferdén elhelyezett kamerának a vízszintes referencia egyenestől történő elmozdulásokat kell érzékelnie.



3.16. ábra: A PHORMS2 alapjául szolgáló geometriai összefüggések a lézervetítő síkja és a képsík között. A leképezésért felelős kamera vetítési centruma az O pontban található h magasságban és t távolra a lézersíktól. A kameraállandó c, a mért pixelkülönbség  $\gamma$ , ami a terep x magasságkülönbsége azaz egyenletlensége miatt adódik

A geometriai összefüggés, amire a használat során szükség van: tartalmazza a képsíkon mérhető pixelkülönbségeket, valamint a kamera külső és belső paraméterkészletét úgy, hogy kiszámítható legyen a lézersíkban tapasztalható  $x$  magasságkülönbség a mért  $y$  képkoordináta különbség alapján. A levezetés elhagyása mellett ez az összefüggés a következő (Kertész & Barsi, 2012):

$$\frac{\sqrt{t^2 + y(h-x)^2}}{\sqrt{c^2 + y^2}} = x \sin \left[ \operatorname{atan} \left( \frac{t}{h} \right) \right] \quad (20)$$

ahol  $h$  a kamera magassága az útburkolat felett,  $t$  a kamera távolsága a lézersíktól,  $c$  a kameraállandó. A tényleges P burkolati pont a P'' pontban képződik le, aminek függőleges terepi vetülete P'. H a kamera főpontja, O a vetítési centrum. A kifejezés rendezhető  $x$ -re, így a (másodfokú) megoldás az alábbi:

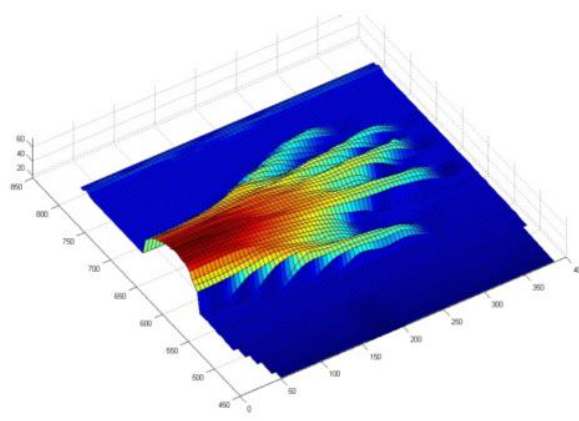
$$x = \pm \frac{y(h^2 + t^2)}{ct \pm hy} \quad (21)$$

A megoldás a két lehetséges gyökből egyértelműen eldönthető.

A monokamerás rendszer tesztelés közben a 3.17. a ábrán látható és a tesztek során nyert lehetséges felületi eredmény pedig a 3.17. b ábrán.



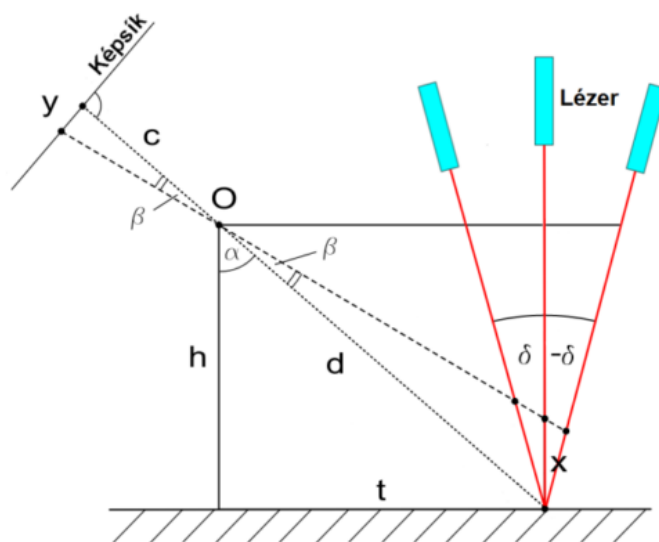
a) a lézersík megjelenése a vizsgált tárgy felületén, amit a ferdén elhelyezett kamera eltérésként érzékel



b) egy a rendszer által végzett felületi rekonstrukció eredménye

3.17. ábra: A PHORMS2 rendszer tesztelése kisméretű tárggyal és a felületi rekonstrukció eredménye

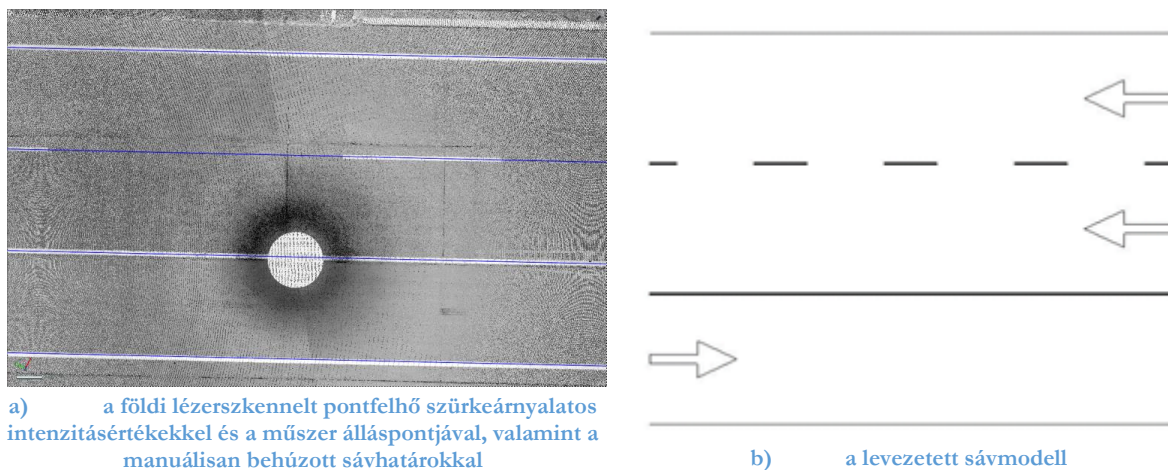
A burkolati mobil térképezési alkalmazáshoz számos vizsgálatot végeztünk a geometriai elrendezésre és annak hatására kapott rekonstrukciós pontosságra. Erre mutat példát a lézersík nem-függőlegességére irányuló elemzés (3.18. ábra) (Kertész, 2011). Sajnos a továbbfejlesztett változat a cég átszervezése miatt nem valósulhatott meg.



3.18. ábra: A PHORMS2 rendszer érzékenységvizsgálata a lézersík nem-függőleges kialakítása miatt

### 3.2.3 Földi és mobil lézerszkennelés útburkolat felületi jellemzőinek meghatározására

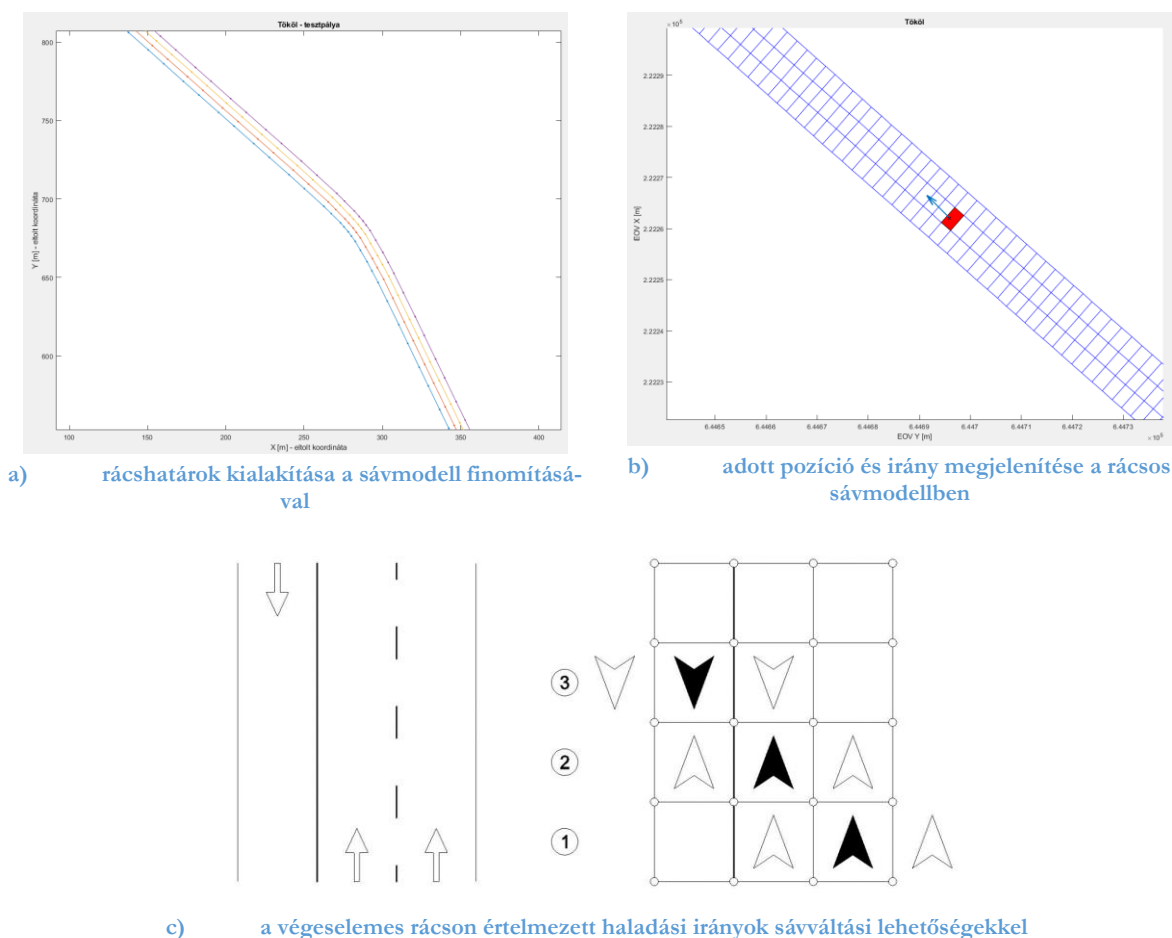
A földi lézerszkennelés (*Terrestrial Laser Scanning – TLS*) olyan felmérési technológia, amely a környezetről háromdimenziós pontfelhőt állít elő, majd annak kiértékelésével felszínborítottsági információra lehet szert tenni. Az útburkolat esetében így a módszer alkalmas arra, hogy a közlekedési sávok határait állapítsuk meg, végeredményben sáv szintű térképet, sávmodellt (*lane model*) hozzunk létre. A 3.19. a ábrán látható egy útpálya felületéről nyert pontfelhő felülnézeti képe, amelyet manuálisan felüldigitalizálva kaptuk meg a sávhatáros térképet. A haladási irányokkal ellátott sávmodell a 3.19.b ábrán látható (Barsi *et al.*, 2017). Mivel az utak hosszanti irányban elnyúló tereptárgyak, ezért a földi lézerszkennelés során több műszerálláspontot kell létesíteni, azokban elvégezni a pontfelhő előállítását, majd a külön-külön kapott pontfelhőket közös pontok segítségével vagy iterált pontfelhőillesztési (pl. ICP – *Iterative Closest Point*) módszerrel egyesíteni kell. A sávmodellt már az egyesített állományon célszerű kialakítani. Amennyiben a kiindulásnak tekintett pontfelhőt globális koordináta rendszerbe (pl. EOV-ba vagy WGS84-be) transzformáljuk például GPS-szel végzett pontmérések révén, a sávhatárok geometriailag már ebben a koordináta rendszerben jönnek létre. A későbbi transzformációk átszámítási módszerekkel ugyan megoldhatók, annak elvégzése jóval könnyebb és pontosabb a kezdeti feldolgozásnál.



3.19. ábra: Földi lézerszkenneléssel nyert pontfelhő intenzitásképéből manuálisan előállított sávmodell

A sávok határvonalainak felhasználásával további, még részletesebb felosztás is készíthető, amely a jármű-irányítás számára hasznos. Ekkor a sávokon belül nagyjából sáv szélességnyi hosszban keresztirányú felosztással végelelemes rács hozható létre (3.20. ábra). Ebben a végelelemes modellben a jármű pillanatnyi pozíciója és iránya diszkrét egységben adható meg, amely a szomszédos rácselemek figyelembe vételével a járműirányítás folyamatában (például sáv váltási manőver során) hasznosul (Barsi *et al.*, 2017). A sáv váltás támogatásához logikai szabályrendszer felállításával a közlekedési szabályok (pl. „jobbra lehetséges a sáv váltás, balra azonban nem”) leképezhetők.



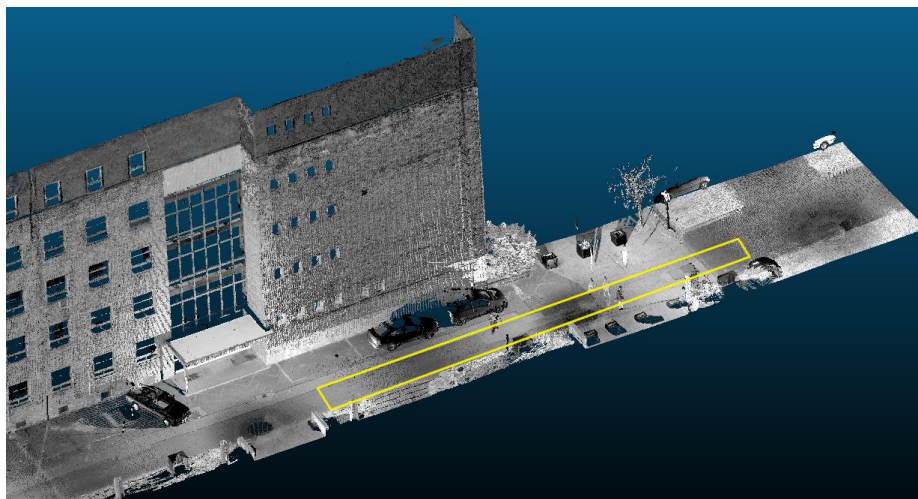


3.20. ábra: Sávmodell finomításával kapott végeleemes rác

A rendkívül finom geometriai felbontással elvégzett földi lézerszkennelés azonban nem csupán a burkolaton látható sávhatárokat vagy burkolati jeleket képes „visszaadni”, hanem a nagy pontsűrűségnek köszönhetően óriási mennyiségű információt hordoz az útpályáról.

A burkolatról visszaverődött pontok ugyanis az útpálya finomszerkezetét képesek leírni, azaz a felület simaságát, érdességét lehet segítségükkel jellemezni. Ennek igazolására a BME kampuszán végeztünk földi lézerszkennelést (3.21. ábra). A szkennelést 10 m-en 6 mm-es felbontással végeztük, csak koordináták és intenzitásértékek rögzítésével. A 129 millió pontot tartalmazó adatállomány mérete 1.9 GB volt. Az ábrán látható sárga, mintegy 30 m hosszú téglalap területén többféle burkolathiba és egyenetlenség látható, így alkalmas mintaterületnek. A téglalap alakú területen aszfalt és kiskockakő burkolattípusokat alkalmaztak, ezért ennek bemutatása szintén lehetséges ezen a mintán.

A burkolat leírására szolgáló mérőszámok helyett egy olyan modellt kerestem, amely azon túl, hogy jellemző mérőszámokat képes szolgáltatni az útpálya állapotáról, erőteljesen képes támogatni az autonóm járműveket és a járműipari fejlesztéseket. Ilyen modell a német Vires cég által koordinált OpenCRG modell (Vires, 2018). Az OpenCRG az OpenDRIVE és az OpenSCENARIO együttesével egy teljes, nyílt forráskódú (*open-source*) szimulációs környezet, amelyben járműveket, azok elemeit vagy a forgalmi helyzeteket lehet vizsgálni. A virtuális tesztkörnyezet (VTD – *Virtual Test Drive*) segítségével gyorsabb és olcsóbb fejlesztések végezhető. Gyors elterjedését annak köszönheti, hogy fejlesztését több autógyártó (pl. Audi, Volkswagen, Daimler) is támogatja és új modellek kidolgozásában alkalmazza.

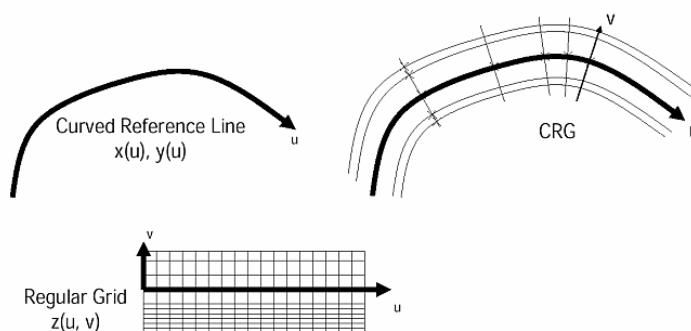


3.21. ábra: Burkolati mintaterület a BME kampuszán. A sárga téglalap a teljes környezetet leképező pontfelhőből került kivágásra. A képen az St épület látható.

Az OpenDRIVE egy de facto szabvány az úthálózat pontos leírására. Gyártófüggetlen csereformátum, amely alkalmas valós útleírásra sávok szintjén, ugyanakkor a számítógépes grafikai munkahelyeken 3D megjelenítésre is közvetlenül használható.

Az OpenSCENARIO a forgalmi szimulációk dinamikus tartalmának leírására szolgáló szabvány. Segítségével a forgalmi helyzetek, közlekedési események kezelhetők.

Az OpenCRG szenzorok, kerekek és járműfelfüggesztés vizsgálatára, súrlódási viszonyok leírására kidolgozott szabvány. A szabvány neve egy rövidítés: CRG – *Curved Regular Grid*, azaz görbült szabályos rács. A burkolat leírására a szabvány ugyanis az út tengelyének (OpenDRIVE-ban is alkalmazott) megadását követően egy helyi görbült rendszerben ír le egy szabályos rácsot (3.22. ábra). Ennek a módnak köszönhetően a burkolat geometriai értelemben pontosan leírható, a szabályos rács segítségével pedig a felület tetszőleges részletességű, általában cm felbontású modellel írható le.

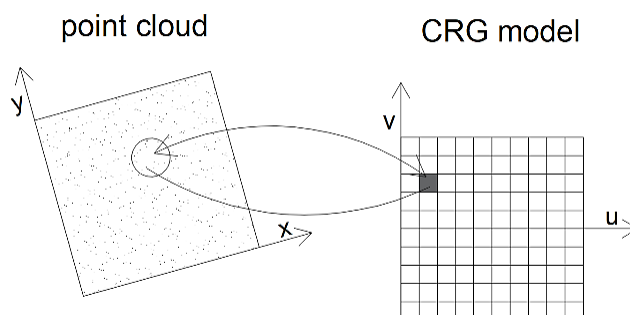


3.22. ábra: Az openCRG modell globális és lokális koordináta rendszerei. A referencia vonal megadása az OpenDRIVE eszközeivel történik, majd arra illeszkednek a szabályos rács lokális rendszerének tengelyei

A szabályos rács kialakítására a szabvány szoftverfejlesztési támogatást nyújt, a magassági adatok létrehozására a földi lézerszkennelés alkalmas, bár a szabálytalan eloszlású pontfelhőből saját fejlesztésű eljárással kell a rácselemekhez tartozó magasságokat meghatározni (3.23. ábra). Eljárásom lényege, hogy a lokális  $u-v$  koordinátákkal adott rácsközéppont globális  $x-y$  koordinátái a referenciavonal paramétereivel számíthatók, majd a kapott középpont a lézerszkennelt pontfelhőbe átvihető és ott annak  $R$  sugarú környezetébe eső pontok magasságainak átlagolásával a CRG-rácsba betölthető (Barsi, Poto & Tihanyi, 2018). A teljes rács

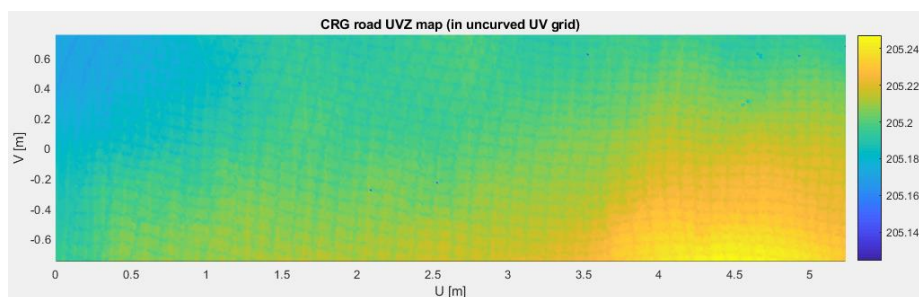


kitöltéséhez a számításokat Matlab és a sokkal hatékonyabb C++ nyelven írt szoftverkörnyezetben végezttem el.

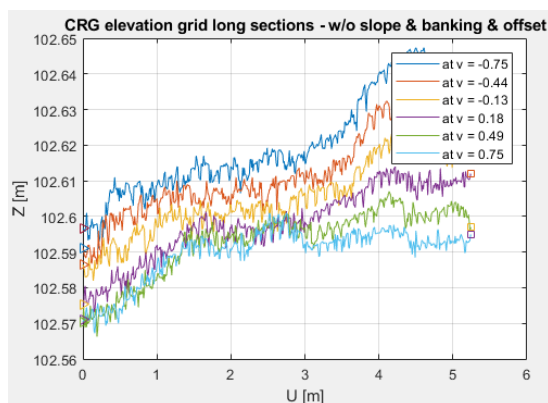


3.23. ábra: Az OpenCRG modell rácspontjaihoz tartozó burkolati magasság levezetése a lézerszkennelt pontfelhőből

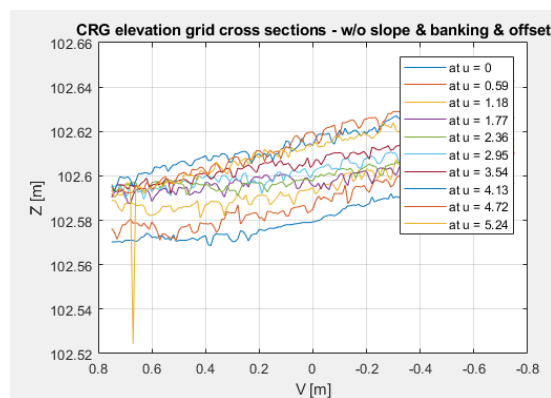
A CRG-modell felülnézeti képe a szokásos területmodellnek megfelelő ábrázolási forma, annak azonban jóval finomabb változata (3.24. ábra). A levezethető burkolati jellemzők között igen informatív a hossz- és keresztirányú metszetek sorozata (3.25. ábra) (Barsi, Poto & Tihanyi, 2018).



3.24. ábra: OpenCRG-modellben felülnézeti képen ábrázolt kiskockakő burkolat. A grafikon jobb alsó részén az 1 cm-es felbontásnak köszönhetően a térkövek könnyen felismerhetők



a) hosszirányú metszetek

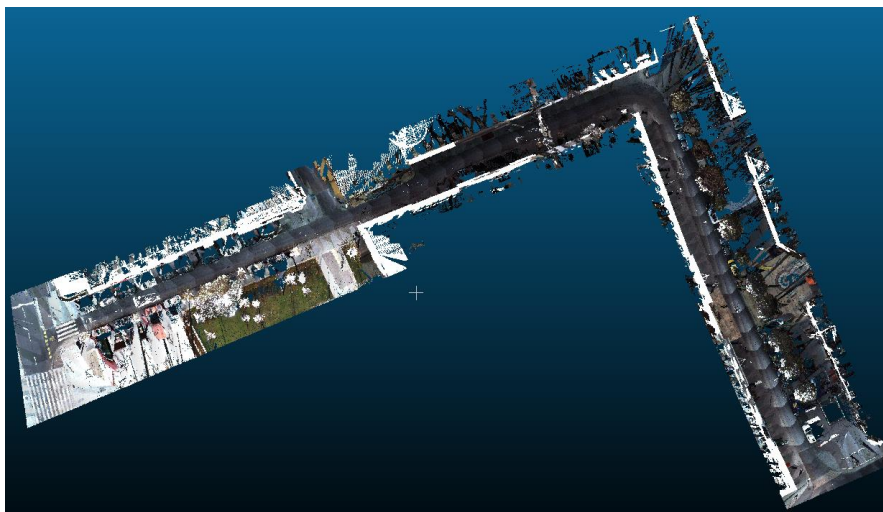


b) keresztirányú metszetek

3.25. ábra: Burkolatmetszetek az OpenCRG modellből

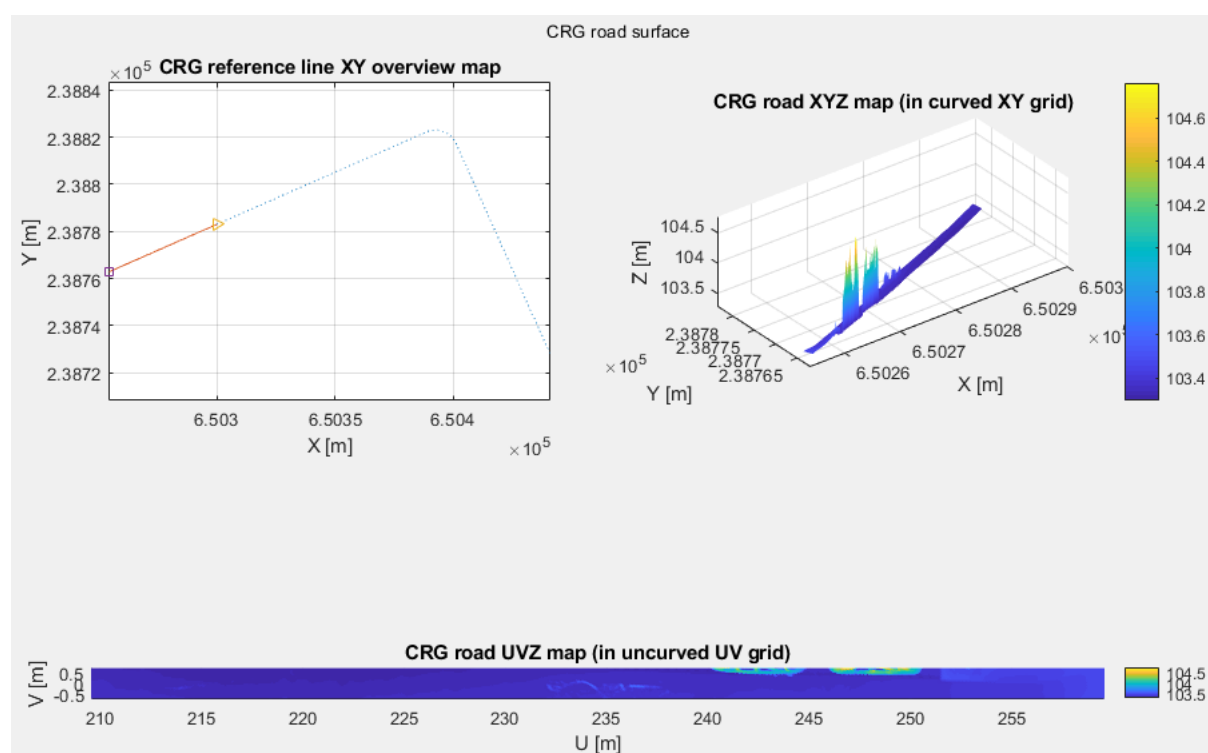
A földi lézerszkennelésnél jóval hatékonyabb felmérési technológia a mobil térképezés részének tekintett mobil lézerszkennelés (*Mobile Laser Scanning* – MLS). A 3.26. ábrán látható a budapesti Piarista köz – Váci utca háromdimenziós színezett pontfelhőjének felülnézeti képe. A felmérést a Budapesti Közlekedési Központ Riegl VMX-450 típusú rendszere végezte 0.5 és 3 cm között változó pontsűrűségben, koordináták és

RGB-színértékek rögzítésével. A szkennelés során 29 millió pontot vágam ki a közel 260 m hosszú mintaterületre, amelynek mérete 1.1 GB-ot tett ki.



3.26. ábra: Mobil lézerszkenneléssel felmért budapesti mintaterület (Piarista köz – Váci utca) pontfelhőjének felülnézeti képe

A földi lézerszkennelésre kidolgozott módszer adaptálható a mobil lézerszkenneléssel nyert adatokra. Ennek igazolására a hosszabb szakasz egy kivágatára levezetett diagramok mutatnak példát (Potó, Csepinszky & Barsi, 2018).



3.27. ábra: A mobil lézerszkenneléssel felmért szakasz kivágatának CRG-jellemzői a helyszínrajzzal, perspektív magasságábrázolással és felülnézeti rácsképpel

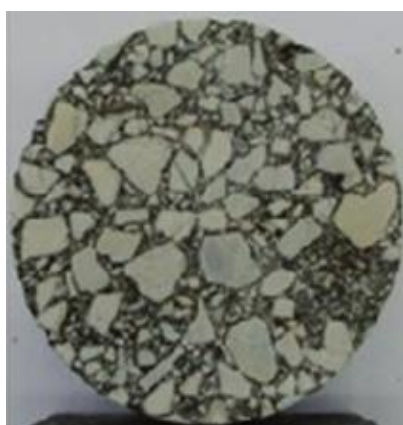
### 3.3 Útpálya belső szerkezetének meghatározása számítógépes tomográfiával

A pályaszerkezet felső részén található burkolat két fontos rétegből áll: a kopórétegből és kötőrétegből. Az ezekből fúrt magminták elemzése elvégezhető számítógépes tomográfián alapuló képfeldolgozási módszerekkel.

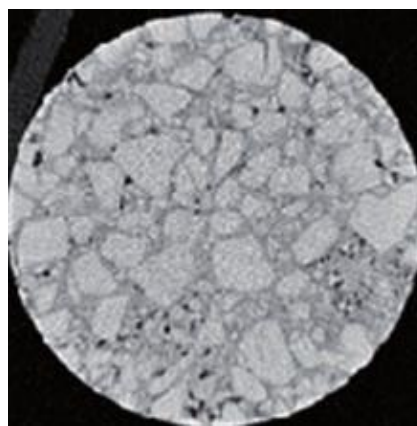
A számítógépes tomográfia (*Computed Tomography* – CT) a humán radiológiai vizsgálatokban széles körben elterjedt módszer. Az eljárás lényege, hogy a vizsgált tárgyat röntgensugárzással „átvilágítják” és sugárforrással szemben a tárgyon átjutó energia detektálásával képet rögzítenek. Majd a tárgy mozdulatlan helyzete mellett egy, az előző pozícióhoz képest a tárgy körül elmozdult sugárforrással ismételt elvégzik a képalkotást. A teljes körülfordulás során így több helyzetből, a tárgyon átjutó sugárzás képe áll rendelkezésre, amikből a tárgy belső szerkezete a körülfordulás síkjában kiszámítható. A teljes tárgy térbeli szerkezetének rekonstrukciójához ezért egymás után következő párhuzamos profilok sorozata vagy újabban körkörösén mozgó felvételezés jelent megoldást. A rekonstrukciós számítás matematikai alapját a 2.2.2. fejezetben említett Radon-transzformáció képezi.

A CT-technika nagy előnye a gyógyászatban, hogy a test belsejében található szervek és szövetek noninvaszív módon (egyszerű megközelítéssel: felnyitás nélkül) vizsgálhatók, továbbá azok részletei finom geometriai felbontás mellett térben tanulmányozhatók (Lublóy *et al.*, 2014).

Az útburkolatból vett magminta elemzésére ezért kiváló eljárásnak látszott és később bizonyult is a CT-technika. Kutatásunk során több 150 mm átmérőjű egyenes henger magmintát vettünk utakból, tipikusan 86 mm vastagságban. Ezeket a mintákat Siemens Somatom Sensation 16 típusú berendezéssel tomográfiai vizsgálatnak vetettük alá és  $512 \times 512$  pixelből álló, 0.39 mm-es pixelméretű digitális képeket kaptunk 1.2 mm szelettávolságban (3.28. ábra) (Lublóy *et al.*, 2015).



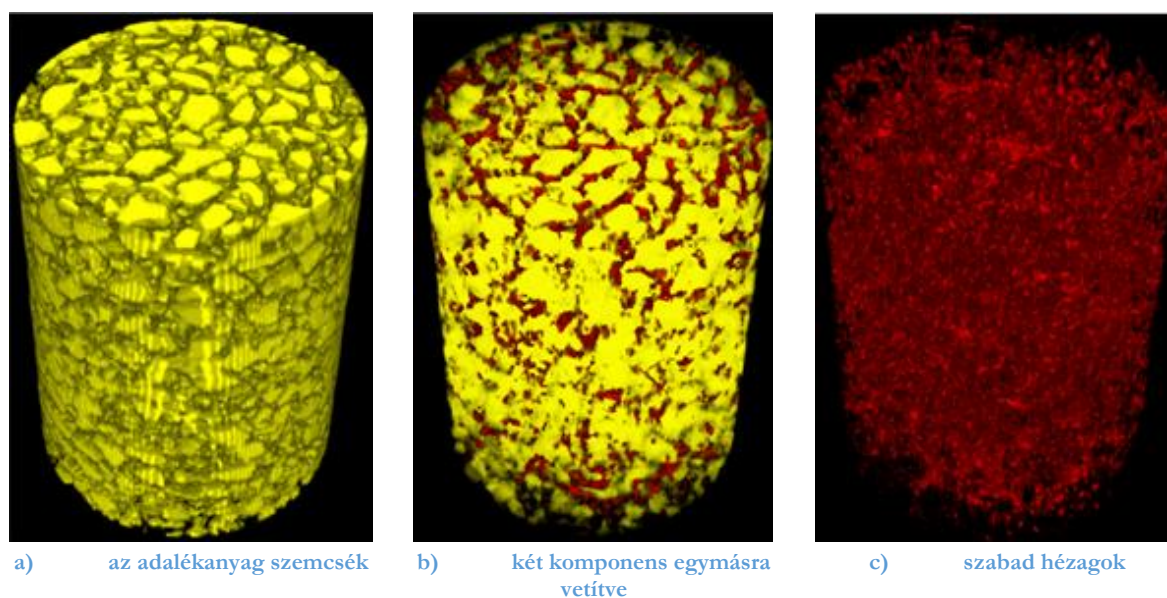
a) keresztmetszeti kép



b) CT-felvétel azonos helyen vett szelete

3.28. ábra: Aszfalt fúrt magmintájának látható keresztmetszeti képe és CT felvétele (Lublóy *et al.*, 2015)

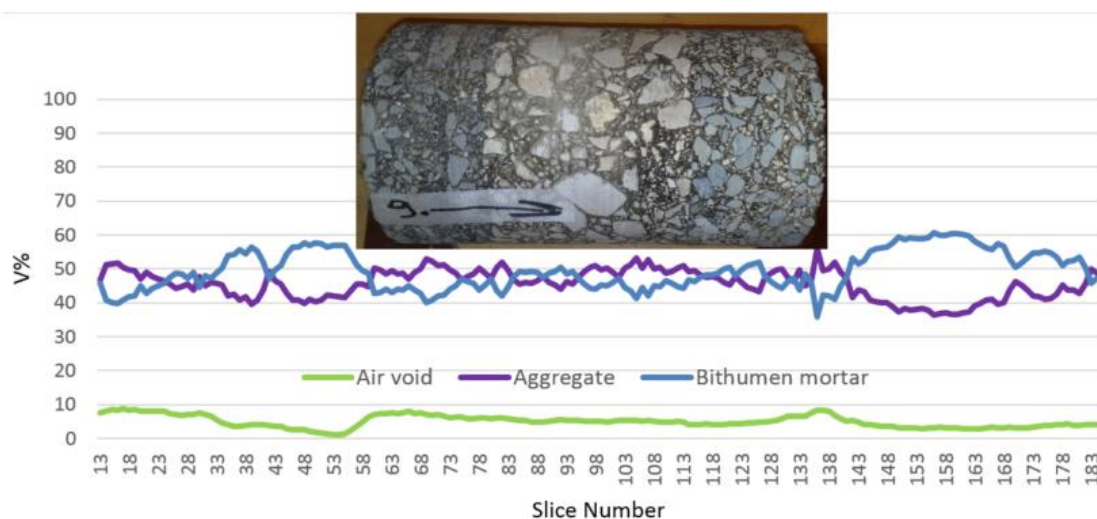
A számítógépes tomográfia segítségével a magminta összetevői szegmentálhatók, azaz például a mintában található minden egyes zúzottkő-szemcse különválasztható (3.29. ábra).



3.29. ábra: A fúrt magminták CT-vizsgálatából kapott sorozatfelvétel szegmentálásával kapott komponensek (Lublóy *et al.*, 2015)

Ennek a szegmentálásnak köszönhetően meghatározható, hogy

- a furatminta globális jellemzők szintjén milyen összetevőket tartalmaz,
- lokálisan változó módon hogyan alakul a kötőanyag, az adalékanyag vagy akár a szabad hézag mértéke és egymáshoz viszonyított aránya (ilyen eloszlásra mutat példát a 3.30. ábra),
- milyen az egyes rétegekben elvárható zúzottkő szemeloszlása, vannak-e anomáliái (pl. csomósodások),
- vannak-e a magmintában markáns réteghatárok, vagy a rétegrendet rendellenes módon megváltoztató törések vagy határvonalak, esetleg megnövekedett szabad hézagot tartalmazó térfogatrészek.



3.30. ábra: A fúrt magminta egyes szeletei mentén megállapított szabad hézag, adalék- és kötőanyag térfogata (Lublóy *et al.*, 2015)

A CT-felvételek alapján megállapítottuk az egyik vizsgált aszfaltminta szétosztályozódását. A kopórétegben az adalékanyag-tartalom 30-40%, a kötőanyag-tartalom 60-70% között változott. A kötőrétegben az adalékanyag-tartalom kisebb, a kötőanyag-tartalom pedig nagyobb volt, mint a kopórétegben. Másik aszfalt mintán megállapítottuk, hogy a kopóréteg alján és tetején nagyobb a hézagtartalom, amit a tömörítéssel tudunk magyarázni. A réteghatárig egyenletes sűrűség- és a hézagtartalom-eloszlást tapasztaltunk (Lublóy *et al.*, 2014).

További vizsgálatokban a hézagtartalom CT-s meghatározását vetettük össze a hagyományos laboratóriumi módszerekkel meghatározott értékekkel (3.2. táblázat). Megállapítható, hogy a legtöbb esetben a tomográfias mérések 10% vagy az alatti eltérést mutatnak a hagyományos módszer értékeihez képest (Lublóy *et al.*, 2015).

3.2. táblázat: A CT-mérések és a laboratóriumi mérések összevetése minták hézagtartalma szerint

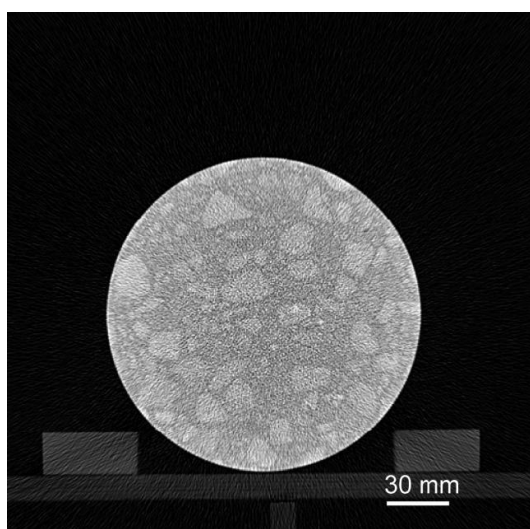
Mintaazonosító	Hézagtartalom (laboratóriumi mérés)	Hézagtartalom (CT-mérés)	Eltérés
3	5.1%	4.9%	4%
	5.7%	5.2%	9%
	5.7%	5.3%	7%
5	5.0%	4.5%	10%
	5.9%	4.4%	25%
9	3.8%	3.9%	3%
	3.9%	5.5%	38%

A vizsgálatok révén az összes alkotóelem külön is kezelhető, ez pedig megnyitja annak a lehetőségét, hogy a minta alapján pontos mechanikai, további lépésben pedig leromlási modell hozható létre alkalmas szimulációs környezetben. A mechanikai modellek például becsülhetővé teszik a minta alapján a burkolat várható teherbírását, a leromlási modell pedig annak a tartósságáról ad képet (Lublóy *et al.*, 2014, 2015).

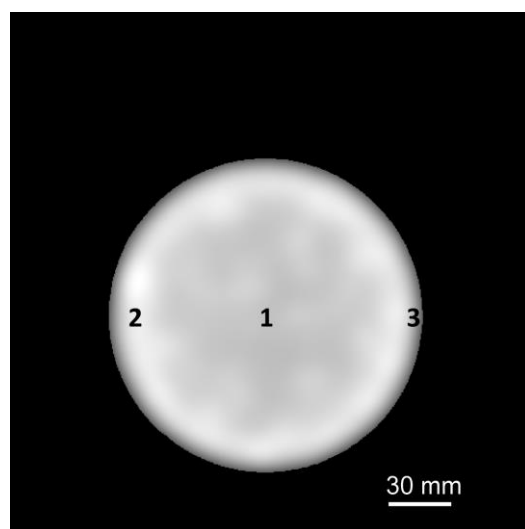
A rekonstrukció elvégzéséhez a CT-eljárásból kapott rétegfelvételek minőségének javításához Fourier-transzformáción alapuló képjavító eljárást dolgoztunk ki, amelynek révén a fűrt magmintát alkotó adalékanyag-szemcsék nagyobb pontossággal határozhatók le, különös tekintettel a minta határfelületéhez közel (Kapitany & Barsi, 2016).

Eljárásunkban a CT-technika ún. nyalábkeményedés (*beam hardening*) effektusának korrekcióját valósítottuk meg. A módszer lényege, hogy először a hasznos képterületet (3.31. a ábra) egyszerű maszkolással lehatároljuk, majd másodrendű Butterworth aluláteresztő szűrővel és gyors Fourier transzformációval (FFT), valamint annak inverzével (IFFT) előállítunk egy ún. megvilágítás-képet (*illumination image*) (3.31. b ábra). A megvilágítás képen látható három elkülöníthető zónából a legszélső sötét zóna határának megállapítását követően eltávolítható. A határvonal függvényanalízissel határozható meg (3.31. c ábra). A pontos határ körkörös maszkolásával a sötét zóna eltávolítható a megvilágítás képből, majd az eredménykép kivonható az eredeti CT-felvétel rétegeiből. Az így kapott korrigált szeletekből végzett rekonstrukció (3.32. ábra) a magminta finom szerkezetének elemzését és megjelenítését teszi lehetővé (Kapitany & Barsi, 2016).

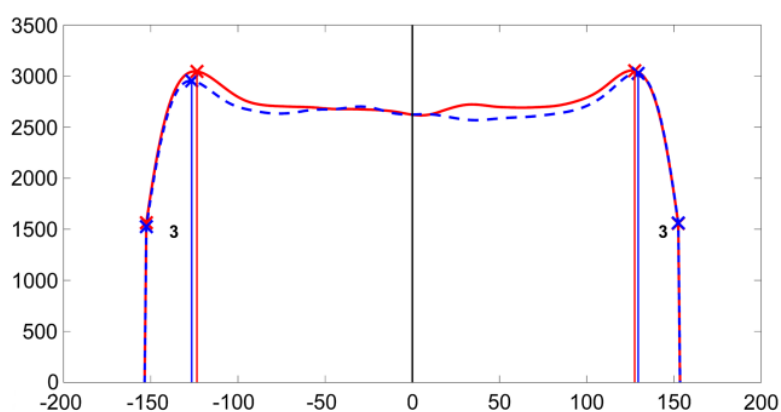




a) a magminta képe a CT-szeleten

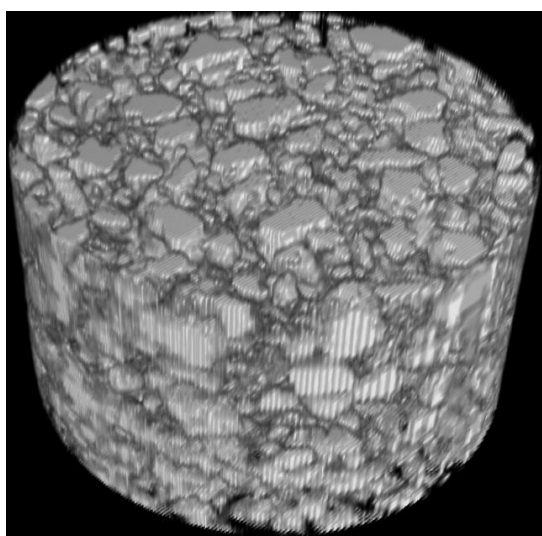


b) a szűrt megvilágítás kép

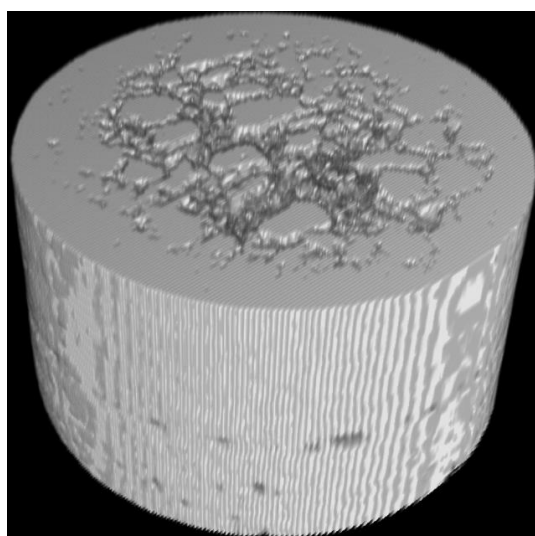


c) a nyalábkeményedésért felelős szélső sötét (3) zóna határának megállapítása a metszETFüggvény analízisével. Az ábrán vízszintesen a minta középpontjától vett távolságok, függőlegesen a pixelek Hounsfield-értékei jelennek meg.

3.31. ábra: A Fourier-transzformációval végzett nyalábkeményedés-korrektúra alapelve



a) rekonstrukció a korrigált CT-szeletekből



b) rekonstrukció az eredeti CT-szeletekből

3.32. ábra: Aszfalt magminta térbeli rekonstrukciójának összehasonlítása a kidolgozott eljárással és anélkül

### 3.4 Hidak lézerszkenneléses mérés technikája

A közlekedési infrastruktúra részét nem csupán az utak, hanem azok műtárgyai is képezik. Ezek a műtárgyak szolgálnak arra, hogy a felszíni közlekedés a terep adottságaitól szinte függetlenül lebonyolódhasson. Ezek a műtárgyak vezetnek át a völgyek vagy más közlekedési létesítmények felett (hidak és felüljárók) vagy a terep felszíne alatt (alagutak vagy aluljárók). Értékük és közlekedésstratégiai szerepük következtében a monitorozásuk vagy akár csak egyetlen időpontra vonatkozó állapotfelvételük az útburkolat felmérésében alkalmazottaktól eltérő mérési módszereket követel meg.

A mérés technika fokozatos fejlődése következtében a mérnökgeodéziában már alkalmasnak bizonyult eljárások megjelennek a műtárgyak méréseiben is. Ennek a folyamatnak a lézerszkennelés, és a távérzékelés más módszerei is részesei. A hidak lézerszkennelése néhány különleges feltétel figyelembevételét követeli meg. Általában nagyobb kiterjedésű létesítmények – főként, ha a környezetüket is mérni kívánjuk; gyakran korlátozott hozzáférésűek, azaz nem lehet minden irányból megközelíteni őket a mérőműszer hatótávolságán belül, stabil elhelyezéssel. Egy Duna-híd esetében például a földi lézerszkennelés a folyam közepéről nem végezhető el ugyanolyan pontossággal, mint a partokhoz közeli részeinél. A mobil térképezés persze biztosít lehetőséget a víz felőli oldal mérésére, ahogy például a Budapesti Közlekedési Központ már említett Karesz rendszere hajóról is felmérte a főváros hídjait.

Kutatásomban a térképezési célú hídméréssel ellentétben az állapotukról képet adó nagyobb pontosságú mérési megoldások kidolgozásában vettem részt. Ennek a munkának a sajátosságai a következők:

- a megtervezett felvételi álláspontok a kedvező pontmérési szögek biztosításához, valamint a minél nagyobb térbeli lefedettség eléréséhez,
- több álláspontból, nagy részletességű pontfelhők terepi előállítás,
- homogén pontsűrűségű és pontosságú összeillesztett pontfelhő levezetése,
- mérnöki vizsgálati és megjelenítési módszerekhez történő igazodás kidolgozása.

A fenti követelmények betartása érdekében ezért a hidak alapos bejárása után gondos méréstervezést követően történt meg a pontfelhők előállítása. Az összes szükséges álláspont bejárását követően az irodai munka során állítottuk elő az egyesített adatállományt, amely a szerkezet jellemzésére alkalmas. A módszertani kutatás ezért a felvételi elrendezés optimalizálását, a hatékony feldolgozási lépések megtalálását, majd az elvárható pontosságú és felbontású adatállomány elkészítését célozta meg. A kutatás a mérési hibák terjedésén keresztül számszerűsítette az adott mérőberendezés (földi lézerszkennér) elérhető pontosságát – nem csupán a megmért pontok térbeli koordinátáira, hanem a létesítmény geometriájára (pl. meghatározott pontjainak távolságaira) vonatkozóan. Természetesen a pontfelhő értelmezése kapcsán a tervezői gyakorlatnak megfelelő rajzi nézetek (pl. keresztmetszetek) és numerikus adatok (pl. távolságok vagy azok változásai) készíthetők el.

A térbeli pontfelhő legnagyobb erejét az adja, hogy a létesítmény egésze vagy annak csak egy kisebb része részletes 3D-s modellé alakítható, amely az eredeti tervekkel összevethető és a megvalósulás így ellenőrizhető.

Természetesen meg kell jegyezni, hogy a lézerszkenneléses mérés technika nem tudja és kívánja a korábbi hidas gyakorlatban megszokott és bevált mérési technológiákat (például a szabatos szintezést) kiváltani, sokkal inkább azok kiegészítéseként kell tekinteni. Ebben az értelemben az eddig nem mért elemek vizsgálata, viselkedéseik tanulmányozása válik lehetővé olyan esetekben, amelyek eddig nem voltak hozzáférhetők, részletes mérések nem volt időben (például egy terheléspróba során egy-egy teherállás alatt) elvégezhető vagy nem volt gazdaságos (Tamás Lovas *et al.*, 2007; Lovas, Barsi, *et al.*, 2008; Berényi *et al.*, 2009; Lovas *et al.*, 2009; Lovas, Berényi & Barsi, 2009).



### 3.5 Következtetések, tézisek

A fejezetben részletesen tárgyaltam az útpálya felületének és szerkezetének vizsgálatára vonatkozó fejlesztéseimet és kidolgozott módszereimet. Ezek nem pusztán elméletileg kidolgozott eljárások, hanem a gyakorlatban mérőrendszer formájában megvalósított megoldások. Mivel viszonylag összetett rendszerekről van szó, ezért a tudományos munka során annak összetevőit is megvizsgáltam, továbbá erőfeszítést tettem a különálló komponensek hatékony integrációjára. Eredményként egy tézist fogalmaztam meg, amely három altézisből áll. A tézis a következő:

**Tézis 2:** Az útpálya felületi és szerkezeti jellemzőinek meghatározására integrált mérőrendszert és megfelelő módszertant fejlesztettem ki.

Az altézisek a sztereofotogrammetria alapelvét követő mobil útburkolati felmérő rendszer kidolgozását, majd ennek továbbfejlesztéseként egy monokamerás felmérő rendszer tervét tartalmazzák. Altézisben foglaltam össze az útpálya felületi jellemzőinek meghatározását földi és mobil lézerszkennelés felhasználásával. Ehhez a fejezethez kapcsolódó tudományos munkában Kertész Imre és Kapitány Kristóf doktorandusz hallgatóim és Tóth Zoltán együttműködő kollégám szereztek PhD fokozatot. Potó Vivien doktorandusz hallgatóm a témán dolgozik jelen pillanatban is.



## 4 Az úthálózat környezeti elemeinek térképezése

### 4.1 Bevezetés

Az amerikai Szövetségi Közlekedési Minisztérium, a NASA és több amerikai egyetem (pl. *Iowa State University*, *The Ohio State University*, *University of California Santa Barbara*, *University of Massachusetts*) részvételével a *National Consortium for Remote Sensing in Transportation* (NCRST) konzorcium azért jött létre, hogy a távérzékelési technológiák alkalmazhatóságát vizsgálják a közlekedés szolgálatában. Négy fő területen foglalkoztak meg a lehetséges kutatási irányokat (Lovas, 2004):

- infrastruktúra (*Infrastructure*),
- környezet (*Environment*),
- forgalom (*Flow*),
- vészhelyzet (*Emergency*).

Látható, hogy az infrastruktúra mellett a konzorcium is hangsúlyosnak tartja a környezet felmérését és térképezését. A környezeti elemek térképezésekor három nagyobb műveleti egységben lehet gondolkodni:

- az adatok előállítása (adatnyerés) a megfelelő tárolási formátumban,
- a nyers adatok transzformációi, amelynek eredményeként létrejön a modell (modellezés),
- az adatmodellre épülő alkalmazások használata és a megfelelő megjelenítés (vizualizáció).

A fenti felsorolásnak megfelelően röviden áttekintem a szóba jövő módszereket. Az adatnyerés szempontjából lehetséges technológiák a következők:

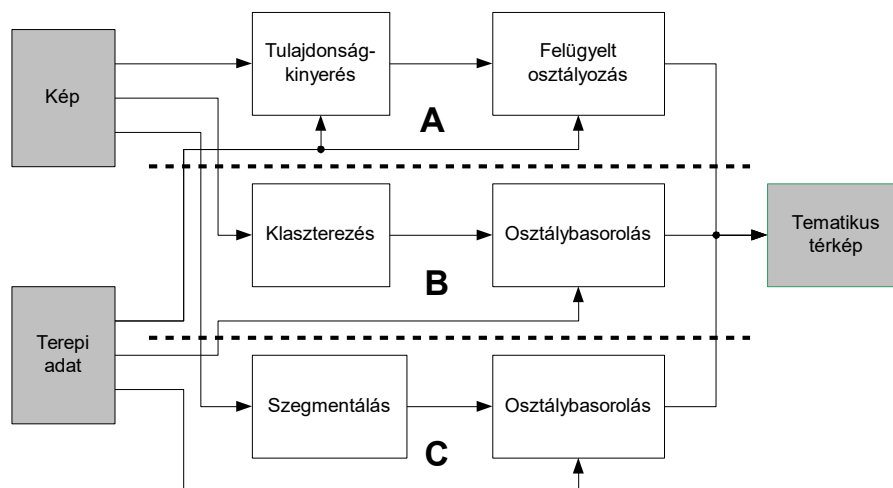
- geodéziai technológiák, amelyek magukba foglalják a tachimetriát, a GNSS alapú felmérési módokat,
- fotogrammetriai és távérzékelési technológiák, köztük a térkiértékelés, a fototopográfia, a drónos felvételezés és a lézerszkennelés különböző módszerei,
- mobil térképezési technológiák.

A felmérési módok esetében jelentős különbségek lehetnek az automatizáltság fokában, a teljesen manuális megoldástól a teljesen automatikusan futó eljárásokig.

A távérzékelési megoldások legfontosabb eredménye a földfelszín borítottsági információi, azaz felszínborítottsági térkép vagy adatbázis. Az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Szervezete, a FAO szerint „*A felszínborítottság a Föld felszínének megfigyelhető vagy megfigyelt (bio)fizikai lefedettsége.*” (Di Gregorio & Jansen, 2000). Ez a meghatározás azonban semmiképpen sem csak a mezőgazdaság vagy élelmezésügy sajátja; használható a műszaki területen is.

A borítottsági térképek a gazdasági életben kiindulási alapoknak tekinthetők, ezért a létrehozásukra komoly erőfeszítéseket tettek és tesznek manapság is. A felszínborítottság térképezése leggyakrabban a tematikus térképezés módszereivel, eljárásaival történik; jórészt azért, mert a borítottság tulajdonképpen tematikus kategóriák megkülönböztetését jelenti.

A 4.1. ábra a tematikus térképezés három fő mechanizmusát mutatja be (Barsi, 2006).



4.1. ábra: A tematikus térképezés három fő végrehajtási módja: a felügyelt osztályozás, a nem-felügyelt (klaszterező) osztályozás és a szegmentálás alapú osztályozás

Az első nagyobb eljárás csoport a **felügyelt osztályozás**. A csoport módszerei a terepről származó ismert tematikájú pixelek – általánosan elfogadott nevükön a tananyag – felhasználásával határozzák meg az alkalmazott eljárás ismeretlen paramétereit. Ebbe a csoportba tartoznak:

- a statisztikai alapokon nyugvó eljárások, mint
  - például a maximum likelihood módszer, ahol a valószínűségi sűrűségfüggvény paramétereire a tananyag alapján lehet jó becslést adni;
  - például a szabály alapú eljárások, ahol az egyes tematikus osztályok megállapításához szabályrendszert kell kialakítani és a szabályok olyan jellemzőket (például az intenzitástér minimális értéke) tartalmaznak, amelyekre vonatkozó becsléseket szintén a tananyagra alapoznak;
- a neurális hálózatok felhasználásával létrejött eljárások, mint
  - például a hibavisszaosztásos (*backpropagation*) típusú hálózatok, amelyek tanítását a tananyag pixeleivel közvetlenül végzik;
  - például a *Support Vector Machine* (SVM) típusú hálózatok, amelyek tanítása is a tananyag segítségével zajlik.

Természetesen a felügyelt osztályozás módszerei nem merülnek ki a bemutatott példákkal; a témában kiváló áttekintést ad (Duda, Hart & Stork, 2001).

A második csoportba a **nem-felügyelt osztályozási módok** tartoznak. Szokás ezt a csoportot klaszterezésnek is nevezni, mivel a képet alkotó pixeleket nem osztályokhoz, hanem önhasonló csoportokba, ún. klaszterekbe sorolják. Mivel a felügyelt eljárásokkal ellentétben itt nincs szükség terepi információra, ezért a gyorsabb és többnyire egyszerűbb futtatásuk miatt sok szerző automatikus osztályozásnak is hívja. A csoport jelesebb eljárásai:

- a statisztikai jellemzők felhasználására épülő megoldások, mint
  - például a *k-means* eljárás, amelynek csoportjait az azokba tartozó n-dimenziós pixelek intenzitásátlagai adják meg, s egy kezdeti véletlenül felvett csoportleírástól iterációval fokozatosan jutunk az önhasználó pixelcsoportokhoz,
- a mesterséges neurális hálózati technikát alkalmazó eljárások, mint
  - például a 2.3.2 fejezetben érintőlegesen bemutatott SOM (*Self-Organizing Map*) technika.

Ennek a csoportnak is kiváló leírása és módszereinek részletezése olvasható a már említett (Duda, Hart & Stork, 2001) könyvben.

A borítottság-térképezés harmadik csoportját a **szegmentálás** alapján végzett osztályozások alkotják. A szegmentálás általában a kép részekre történő bontása; lehetséges pontszerű, vonalszerű és felület(polygon) szerű képrészek létrehozása (Barsi, 2006). Esetünkben a felületszerű szegmentálásnak jut szerep. A szegmentálást követően a kép hézag- és átfedésmentes poligonokra tagolódik, amelyekhez tartozó pixelek alapján különböző geometriai, topológiai vagy alakjellemző vezethető le. A szegmentálással kapott poligonokat tekinthetjük objektumoknak és így az objektum orientált képfeldolgozás előtt nyílik meg a tér (Blaschke, 2010). A fenti három tematikus térképezési eljárás csoport úrfelvételek, légifényképek, de akár lézerszkennelt vagy mobil térképezéssel és más hasonló terepi adatgyűjtéssel létrehozott adatok feldolgozására alkalmas.

Az úthálózat számítógépes megjelenítése nem korlátozódik azok gráfként, esetleg síkbeli környezetükkel kiegészített ábrázolására. A felhasználók jobb kiszolgálása érdekében a járművekben megtalálható beépített és mobil rendszerekben a kijelzés, megjelenítés egyre inkább háromdimenziós. Ez azt igényli, hogy az útkörnyezet domborzata és a jelentősebb objektumok (tipikusan a településeken belül található épületek) jelenjenek meg a térképi adatbázisban. Ez az elvárás magával hozta azt is, hogy gyökeres változáson ment/megy keresztül a térképi adattárolás technológiája.

A térinformatikában a háromdimenziós környezet leírásában a legfontosabb a digitális terepmodell (DTM, angolul *Digital Terrain Model* – DTM), ami a terep digitális változata, a síkrajz és a domborzat együttese. A földfelszín magassági adatainak modellje a digitális domborzatmodell (DDM, angolul *Digital Elevation Model* – DEM) vagy ritkábban digitális magasságmodell (DMM, angolul *Digital Height Model* – DHM). Előfordul, hogy szintvonalakkal reprezentáljuk a felszínt, ez a digitális szintvonalmodell (DSZM, angolul *Digital Contour Model* – DCM). A domborzat és a rajta megtalálható létesítmények, épületek, növényzet együttesen a digitális felszínmodell (DFM, angolul *Digital Surface Model* – DSM), a tisztán matematikai leírása a digitális felületmodell (szintén DFM, az angol megfelelője is ismétlődik: *Digital Surface Model* – DSM) (Mélykúti, 2005). A magassági viszonyok szempontjából a két legfontosabb a puszta földfelszín, vegetáció és ember építette objektumok nélkül: ez a digitális domborzatmodell; míg a természetes és mesterséges tereptárgyakat is tartalmazó változat a digitális felszínmodell.

A domborzati és magassági információkat többféle technikával is elő lehet állítani. Az adatgyűjtésben kiemelkedő volt korábban a geodéziai és topográfiai (tachimetriai) felmérés, később a GPS-alapú terepfelvétel. Nagyobb hatékonyságú volt és manapság is történik a fotogrammetria segítségével végzett magassági kiértékelés. Ez eleinte manuálisan, majd automatikus módszerek alkalmazásával működött. Az automatikus eljárások egyik legelterjedtebb megoldása a korrelációs technikán alapuló képillesztés (*image matching*) (McGlone, Mikhail & Bethel, 2004).

A domborzatmodell előállításához használható jelenkori adatnyerési módszerek közül talán a leghatékonyabbnak a légi lézerszkennelés tekinthető. Ennek a technikának köszönhetően tervezett terepi geometriai felbontás mellett lehet magassági adatokat gyűjteni – nagy pontossággal és homogén minőségben (Chen *et al.*, 2016).

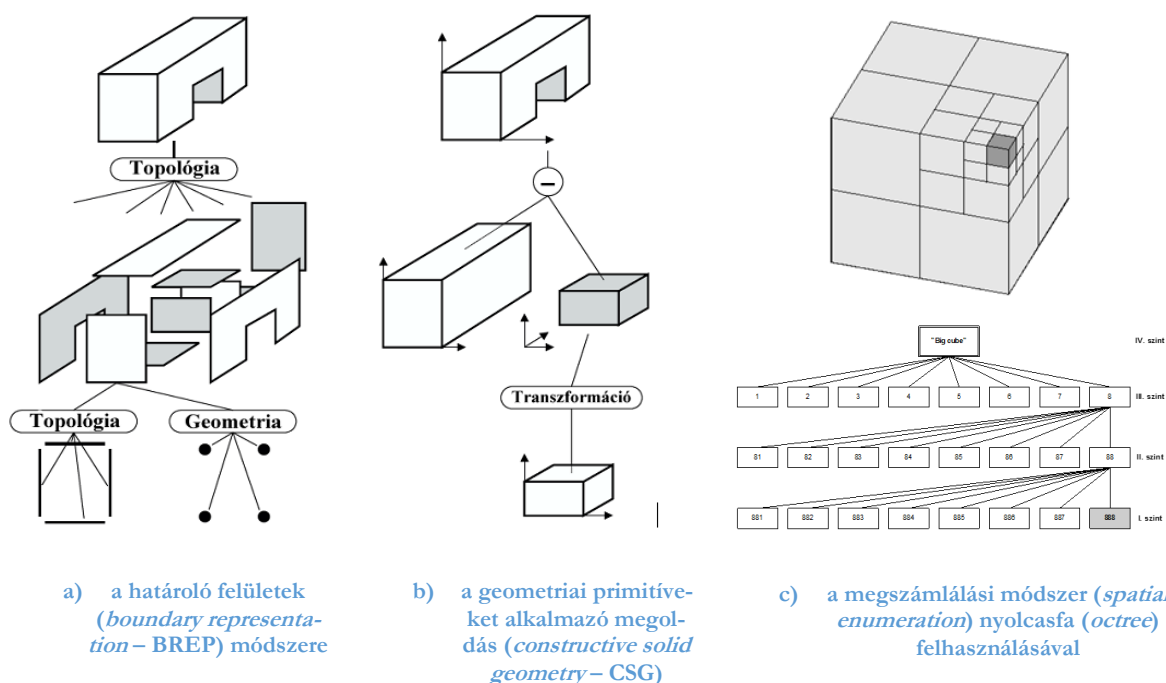
A földfelszín globális magassági viszonyainak ismeretéhez a műholdas és egyéb űrtechnikák tették talán hozzá a legtöbbet. Az Endeavour űrsiklóval végzett *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) nyújtotta azt a

minőséget, lefedettséget és nem utolsósorban ingyenesen, amely az ilyen adatok elterjedéséhez igen jelentős mértékben hozzájárult. Az interferometrikus radar technikával készült modell globális lefedettséggel 1 szögmásodperces (kb. 30 m-es) terepi felbontással érhető el (NASA, 2018).

A terep magassági viszonyai mellett további fontos elemek a mesterséges környezet részét képező tárgyak, főként az épületek. Az épületek térbeli modelljeinek létrehozásához (Brenner, 2000) szerint légi és földi technológiák jöhetnek szóba. A légi csoportba sorolja az űrfelvételeket, a légifényképeket, a légi lézerszkennelést, a SAR-feldolgozást, míg a földi csoportot a geodézia, a közelfotogrammetria és a földi lézerszkennelés képviseli. Szerinte emberi interpretációval vagy akár anélkül is működnek az épületrekonstrukciós eljárások. Az épületmodellek létrehozásához a felületek kinyerését, majd az azokból végzett térbeli rekonstrukciót tekinti a folyamat részének. Utóbbi elvégzéséhez a felületekből topológiai szabályokkal kell összeállítani az épületet (4.2. ábra a része). A térbeli rekonstrukció elvégezhető egyszerű geometriai elemek, ún. primitívek felhasználásával is; ekkor gyakran az azok közötti alpműveletek (unió, metszet, különbség stb.) végrehajtása sem nélkülözhető (4.2. ábra b része). A geometriai primitívek (alapelemek) tipikus képviselői a paraméteres, prizmatikus, poliédres, szabályos felületű, valamint a szabad formájú testek.

Az épületek térbeli rekonstrukciója elkészíthető ún. megszámlálási eljárással, amelynek legismertebb reprezentációja a voxel-modell (4.2. ábra c része). A háromdimenziós térfogatelemekhez (*volume elements* – voxels) nem csupán a geometria, hanem akár többféle fizikai vagy egyéb tulajdonság is hozzárendelhető.

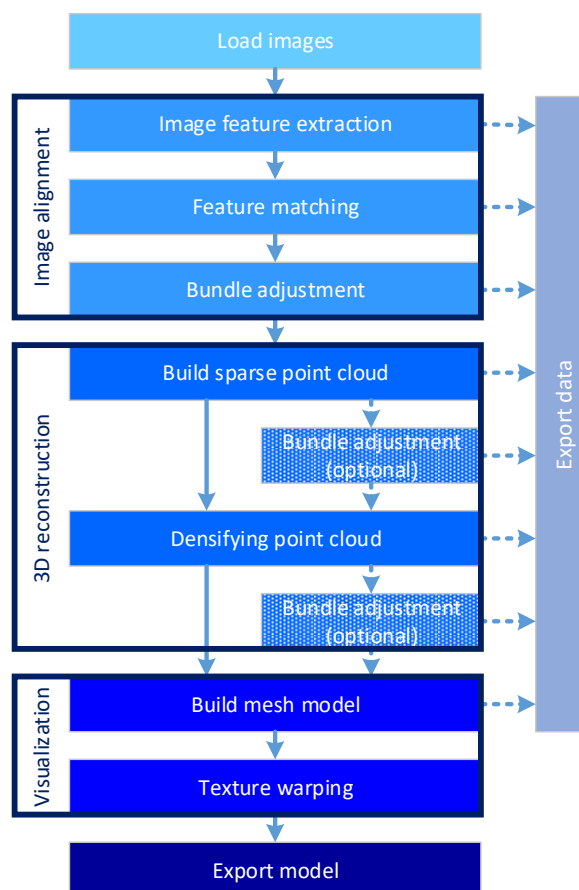
Ezeknek a rekonstrukciós filozófiáknak a gyakorlatban számos megvalósítása született meg, amelyekkel nemcsak egyes épületeket, hanem teljes városmodelleket hoztak létre. Ezek a városmodellek fontos elemei (lesznek) a közlekedést támogató térinformatikai adatbázisoknak.



4.2. ábra: Az épületrekonstrukció fontosabb irányzatai ((Brenner, 2000) és saját szerkesztés)

Az eddig létrehozott városmodellek többnyire telekommunikációs modellezési és tervezési feladatok megoldására születtek. Később a részletezettséget megállapítva jól elkülöníthető szinteket határoztak meg: ezek a *Level-of-Detail* (LOD) szintek. A mai elvárások már a legmagasabb szinthez tartozó városmodelleket célozzák meg, így a közlekedés kiszolgálására is ezek a szintek tűnnek alkalmasnak. Többféle társaságnak és felhasználásnak azonban többféle felosztása és értelmezése létezik egyidejűleg (Biljecki, 2013).

A háromdimenziós felületek és tárgyak rekonstrukciójában a *Structure-from-Motion* (SFM) technika megjelenésével az elmúlt egy-két évtizedben forradalmi változások mentek végbe. Az SFM-módszer segítségével a tárgyról készült optikai kameraképek térbeli helye és helyzete hatékony érdeklődési operátorokkal meghatározható, majd mindkét képen talált homológ pontok bevonásával először ritka, majd sűrű rekonstrukció számítható (Hartley & Zisserman, 2003).



4.3. ábra: Az SFM-alapú tárgyrekonstrukció folyamata

A 4.3. ábrán látható, hogy a kép alapú 3D-s tárgyrekonstrukció folyamatában az első műveletcsoport a képek helyének meghatározása, amihez képjellemzők levezetését követően azok illesztése és egy sugárnyalábki-egyenlítés történik. Ennek a blokknak a szokásos elnevezése az SFM. Utána már az ismertté vált képi tájékozások birtokában előbb a ritka, aztán a sűrű pontfelhő levezetése zajlik. A sűrű modell levezetéséhez fontos matematikai és algoritmikus eredmények Furukawa és munkatársainak köszönhetők (Furukawa & Ponce, 2010). A legismertebb kidolgozott módszer a *Multi View Stereo* (MVS) eljáráscsaládba tartozó *Clustering Views for MVS* (CMVS), amelynek mára számos változata fejlődött ki. Ebben a fázisban ölt testet a modell. Esetenként kiegészítő kiegyenlítési lépésekkel szokás a számítás pontosságát növelni, illetve a képek geometriai elrendezésének numerikus stabilitását fokozni. A keletkezett modell megjelenítéséhez szabványos számítógépes grafikai megoldásokkal élünk: a szabálytalan elrendezésű pontfelhőből térbeli rács (*mesh*) szervezhető, amelynek alkotó háromszögeire az eredeti képek intenzitásértékeit feszítve textúrázható a „csupasz” rács. Az így létrejövő fotorealistikus kimenet más rendszerek és későbbi felhasználás számára exportálható (Somogyi & Barsi, 2016).

Ennek a technológiának köszönhetően a kép alapú tárgy- és térrekonstrukció gyakorlatilag felfejlődött a lézerszkennelés mellé és hatékonyságában valamint pontosságában összemérhető lett azzal (Chen *et al.*, 2016; Somogyi, Lovas & Barsi, 2017).



## 4.2 Kétdimenziós környezeti modellek

Az úthálózat környezetének modellezésében az egyszerűbb megoldások már kétdimenzióban, síkrajzi-helyszínrajzi értelemben működnek. A felszínborítottság térképezésére használatos módszerek ebben a feladatban is beválnak, a kutatásom ezért arra koncentrált, hogy a már egyébként is széles eljáráskör mellé alapvető módszer fejleszthető-e.

Az önszerveződő neurális módszerekhez tartozó SOM-technika elterjedten használatos nagyobb adatmennyiségek szegmentálásában, elemzésében (Kohonen, 1995). A távérzékelte képek feldolgozásában ezért a technika reménytelinek ígérkezett.

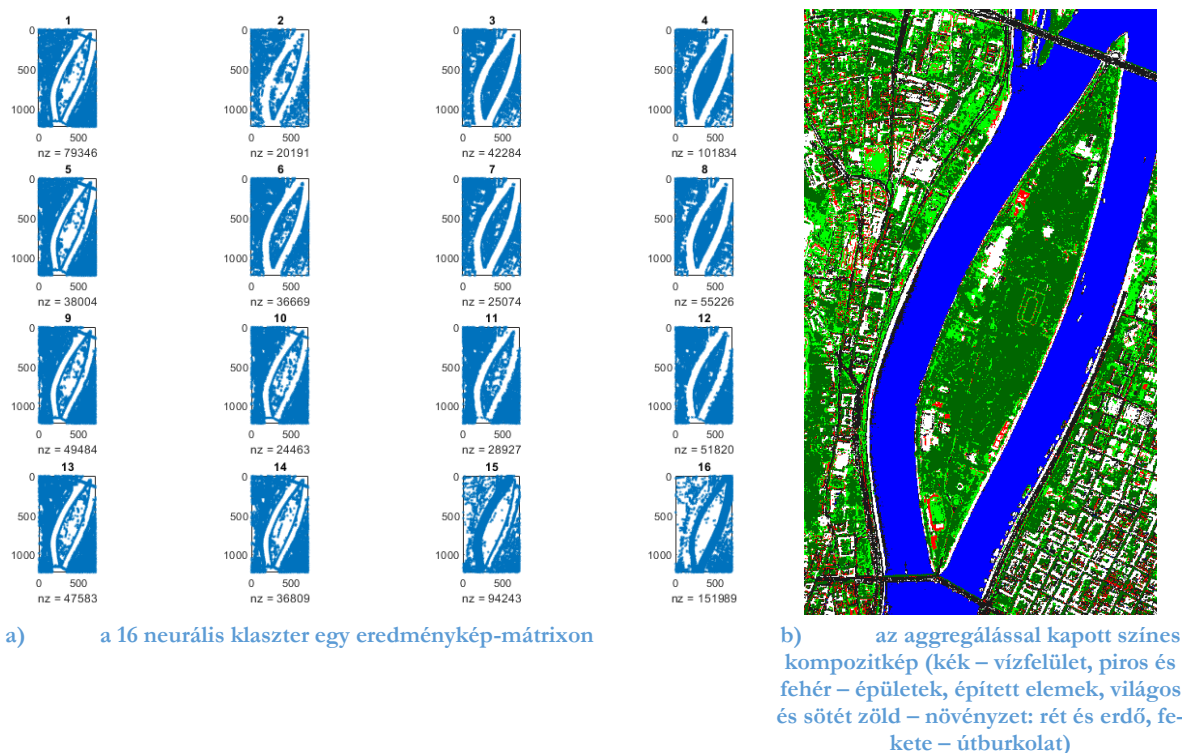


a) a látható RGB-csatornák színes képe

b) a közeli infravörös csatorna intenzitásképe

4.4. ábra: A szegmentálás bemenetét jelentő nagyfelbontású Quickbird űrfelvétel látható és közeli infravörös képei

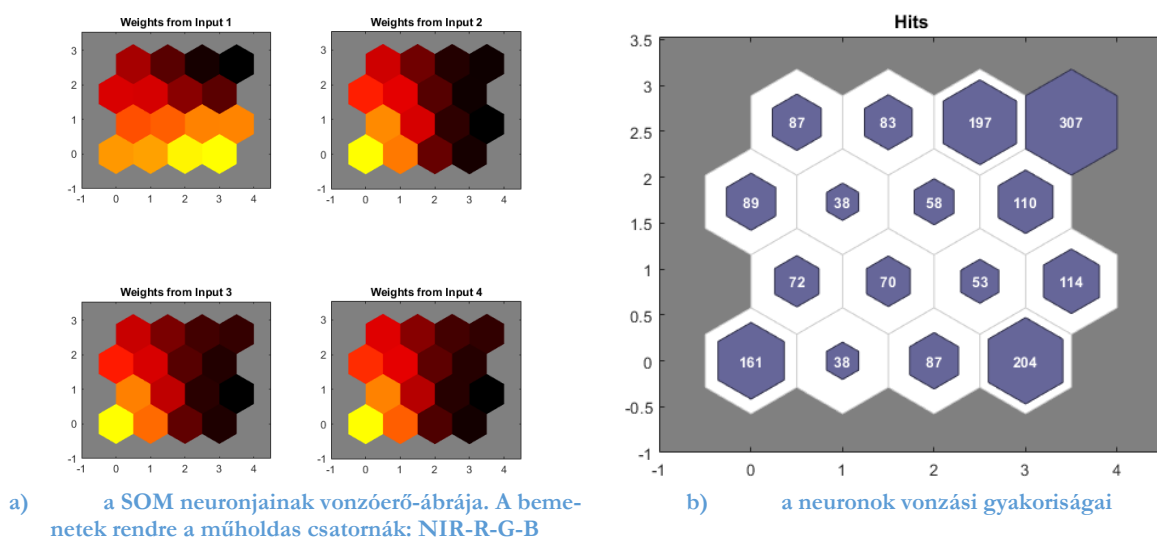
Kutatásomban ezért a megvizsgáltam, hogy a nagyfelbontású űrfelvételek szegmentálása elvégezhető-e ennek az eljárásnak a segítségével (Barsi, Gáspár & Szepessy, 2010). A kísérletben a Digital Globe Quickbird platformjáról 2004. augusztus 4-én Budapest és környékéről készült 2.4 m geometriai felbontású 11-bites valódiszínes (RGB) és közeli infravörös (NIR) tartományban készült multispektrális csatornákat használtam (4.4. ábra). A kivágat a Margit-sziget és környékét ábrázolja; a kép  $721 \times 1226$  pixel méretű. A könnyebb kezelés érdekében a radiometriai felbontást 8 bitre redukáltam. A szegmentálást SOM neurális hálózattal végeztem, amelyhez több futtatásból empirikusan meghatározott paraméterek a következők voltak: maximális epoch-szám 100,  $4 \times 4$  neuron hexagonális szomszédsági elrendezésben az élek mentén mért távolságnormával (*linkdist*). A végcél 6 tematikus kategória levezetése volt, amelyben (1) folyó, (2) út, (3) rét, (4) erdő, (5) fehér tetős épület, (6) piros tetős épület szerepeltek. A 6 tematikus osztály a 16 neurális klaszterből egyszerű aggregálással volt elérhető (4.5. ábra).



4.5. ábra: A SOM-szegmentálás eredménye a klaszterek és az azokból aggregált tematikus térkép

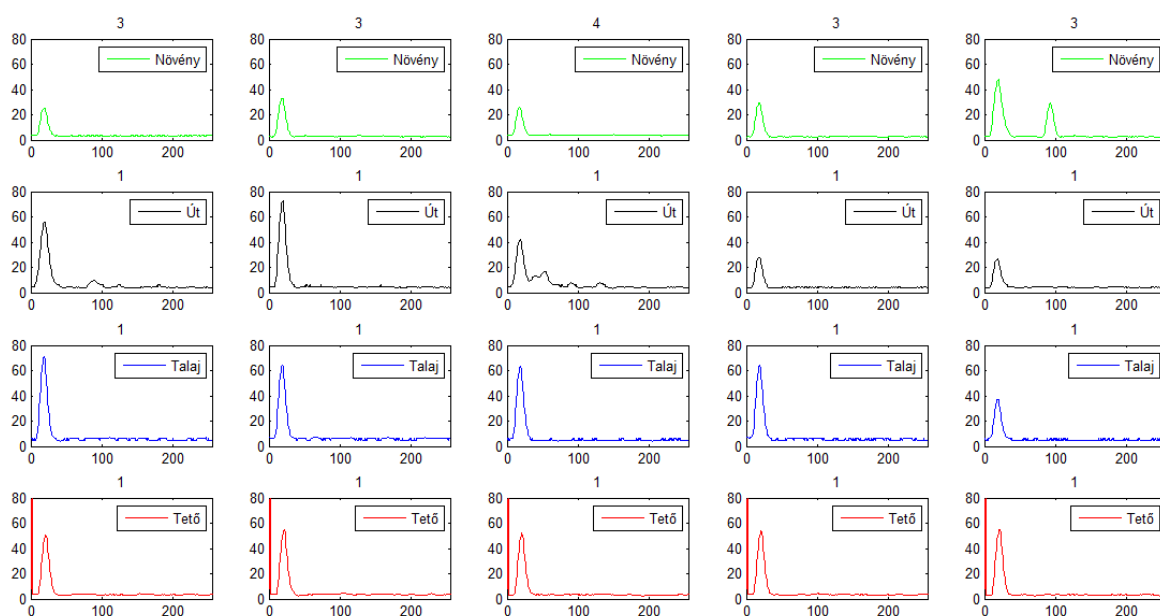
A SOM neurális hálózat kimenetként nem pusztán az adatpontok klaszterezését, azaz az űrfelvétel szegmentálását végzi el, hanem a számításban szereplő neuronok hálózatban betöltött szerepe is értékelhető. A tanítóanyagon levezethető a SOM vonzerő-ábrája (4.6. a ábra), amely megmutatja, hogy a hálózat egyes neuronjai a versengés során mennyire voltak erősek, azaz milyen mértékű erősítést tapasztaltam a training alatt. Ez az ábra ezen túl rámutat arra is, hogy a bemenetre bocsátott műhold-csatornák mennyire függetlenek a tananyag szerint. Esetemben a csatornák közül a 2-4. számú meglehetősen hasonló, vagyis a látható tartomány sávjai (RGB) nagyon hasonlóak, így a feldolgozásban csak ezek alkalmazása nem fog számottevő különbséget eredményezni, hanem a véletlen hibák miatt fogunk szóródást tapasztalni. Ezzel szemben az 1. sáv – a közeli infravörös – jelentősen eltér a többitől, így ez a csatorna igazi információhordozó. Ez a megjelenítési mód egyfajta neurális tapasztalati faktoranalízisnek tekinthető.

A másik szintén lényeges adatminőségi kimenet a mintaadatok besorolási ábrája (4.6. b ábra). A vonzási gyakoriságok ugyanis a kimeneten jelentkező besorolásokat jellemzik, ami a távérzékelte felvétel klaszterezését jellemzi. A klaszterezés ugyanis hibásnak tekinthető, ha a neuronok közül valamelyik a többi rovására a minta adatpontjainak túlnyomó részét magához tudja vonzani. Ez az eredmény csak akkor fogadható el, ha a szegmentálni kívánt felvétel nagy, homogén képrészletekből áll. Szerencsére, ez most nem következett be. A neuronok vonzási diagramja a klaszterek tapasztalati gyakoriságábrájaként értelmezhető (Barsi, Gáspár & Szepessy, 2010).



4.6. ábra: A létrehozott SOM neurális modell grafikus jellemzői a neuronok hasonlóságának és vonzási gyakoriságainak feltüntetésével

A teljes hullámalakos (*full waveform*) légi lézerszkennelés az utóbbi évtizedben kezdett nagyobb lendületet venni, mivel a lézerszkennerek mára képessé váltak arra, hogy nem csupán a korábbi első-utolsó visszaverődés jeleit rögzítik, hanem akár 256 köztes visszaverődés jeleit is. Ennek a megnövelt kvantálásnak köszönhetően jóval nagyobb adatmennyiséget kell feldolgozni, de a kutatás sokat vár ettől az új eszköztől. 2015-ös vizsgálataink szerint Siófokról készült teljes hullámalakos légi lézerszkennelés alkalmas önmagában is arra, hogy optikai felvételek nélkül a jelentősebb felszínborítottsági kategóriákat hullámalak-jellemzők levezetését követően meghatározzuk (Neuberger, Barsi & Juhász, 2015). A 4.7. ábrán látható néhány minta teljes hullámalakja. A felmérést Leica ALS70 HP diszkrét és Leica WDM65 teljes hullámalakos rögzítő modullal végezték.

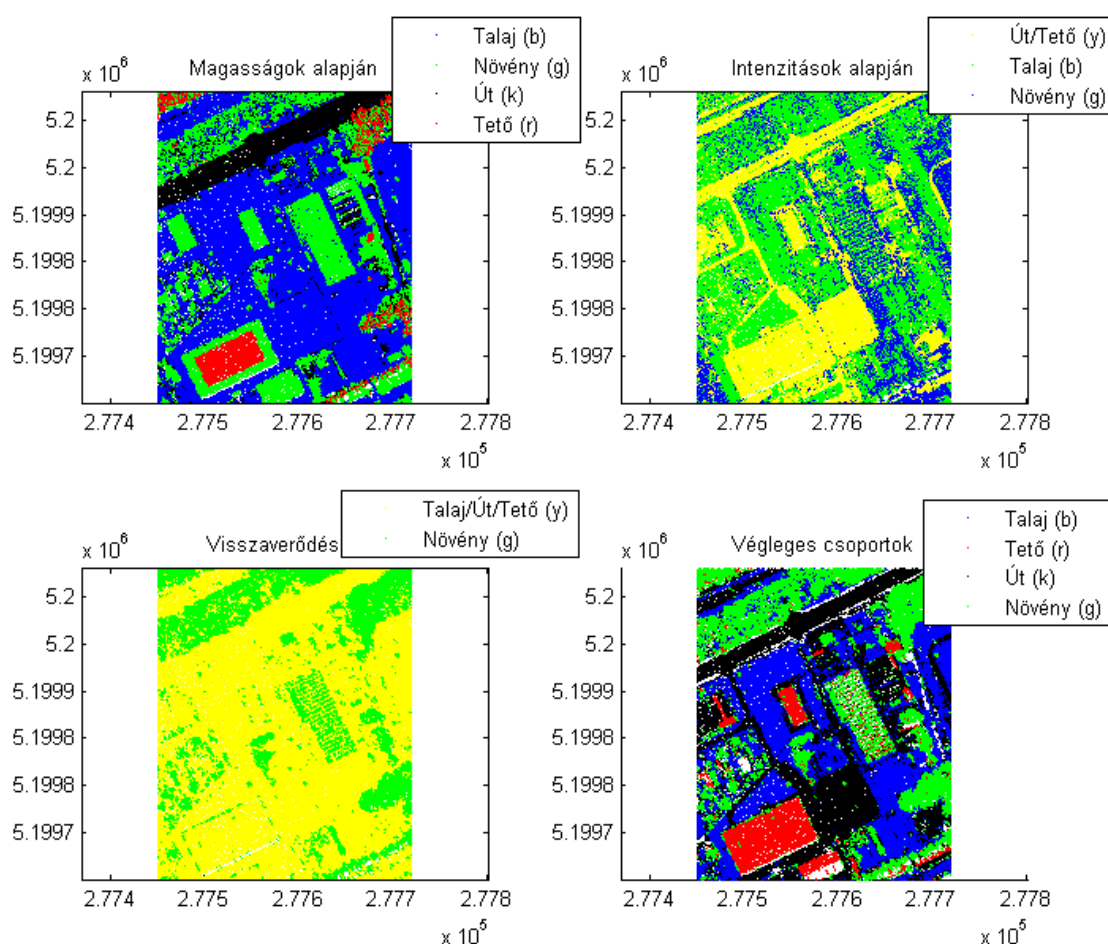


4.7. ábra: Négy tematikus osztály (növényzet, épület, talajfelszín, út) mintájának teljes hullámalakos képe

Jól megfigyelhető, hogy tematikus osztályokhoz tartozó minták szerint elvégzett hullámalak-statisztika markáns sajátosságokat mutat:

- a növényzet egy hullámcsúccsal rendelkezik,
- az utak több hullámcsúcsúak,
- többszörös visszaverődésnél a diszkrét visszaverődések száma nem azonos a hullámalakok csúcsainak számával.

Ezek a megfigyelések kihasználhatók a lézerszkennelt adatok klaszterezésében, majd az azt követő manuális aggregációban. A különféle attribútum (tengerszint feletti magasság, visszaverődött jel intenzitásértékei, visszaverődések száma) szerint végzett, SOM technikát alkalmazó klaszterezés a 4.8. ábrán látható eredményeket szolgáltatva (első három diagram). A külön-külön elvégzett neurális kiértékelés eredményét ezt követően manuális aggregálással tematikus térképpé lehet átalakítani (4.8. ábra jobb alsó diagramja).

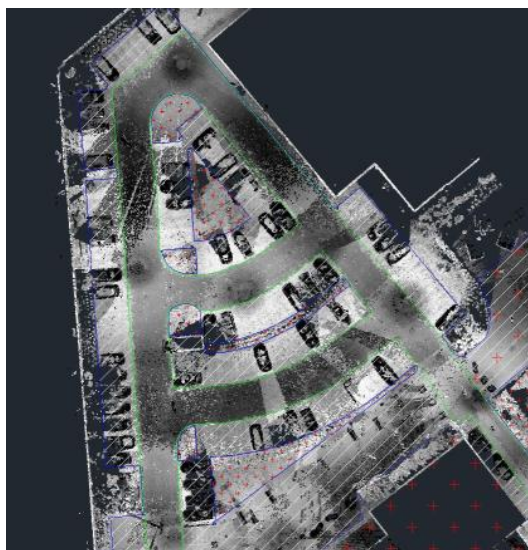


4.8. ábra: Négyféle manuális csoportosítással készült SOM-alapú klaszterezés eredménye

A földi vagy mobil lézerszkennelés olyan technológia, amely a légihez hasonlóan alkalmas a környezet térképezésére. Az útburkolat felületén kívül (lásd 3.2.3. fejezet) a teljes szomszédos környezet (épületek, növényzet, útbútorok stb.) felmérése végezhető el. Mintaként a BME kampuszán végzett munkát mutatom be. A területet földi lézerszkenneléssel több álláspontból 10 m-en 6 mm felbontással, közel 2 mm pontossággal felmértük, majd azokat egyesítettük. Az RTK-s GPS-szel elvégzett mérésnek köszönhetően a pontfelhőt jobb, mint 2 cm abszolút térbeli pontossággal helyeztük el az EOV koordináta rendszerében. A pontfelhőt



ezután a relatív magasságok szerint szegmentáltuk, majd a terepfelszín (talajszint) közelében 1 m-es sáv kivágásával eltávolítottuk a jelen feladat szempontjából irreleváns, azonban jelentős adatmennyiséget jelentő pontfelhő-részt. A csökkentett pontfelhő CAD rendszerben elvégzett manuális kiértékelésével (4.9. ábra) négy kategóriát térképeztünk: mindig járható burkolat, potenciális parkoló felület, nem járható terület és a minimális befoglaló téglalaphoz szükséges kiegészítő egyéb terület.



a) az egyesített pontfelhő manuális kiértékelésével kapott vektoros térkép

#### Jelmagyarázat

terkep\_cad\_2007\_jav entities Polygon

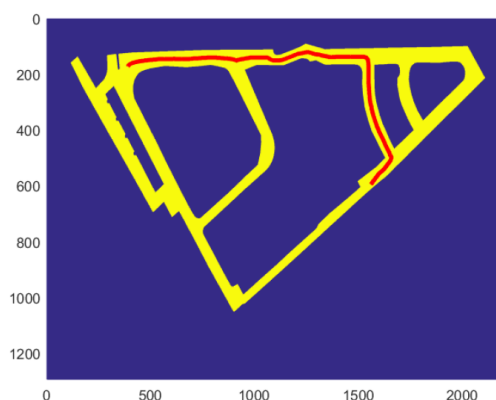
- járható útfelület
- potenciális parkolófelület
- nem járható felület
- kitöltő felület
- egyéb



b) a raszterizált, azaz GRID-formátumú statikus foglaltsági térkép

4.9. ábra: A statikus foglaltsági térkép levezetése TLS-mérésekből

A kapott CAD-es vektoros állományból SHP-formátumon keresztül GRID-modellt vezettünk le, amely raszteres reprezentációban  $2204 \times 1294$  elemmel leírja a terület statikus foglaltsági térképét (*static occupancy grid*). Ennek a rácsnak a járható felületekre szűkített maszkolása alapot biztosít a trajektóriatervezéshez (Barsi *et al.*, 2018). Egy lehetséges scénáriónak megfelelő, tervezett jármű-trajektória látható a 4.10. ábrán. Hasonló módon mobil lézerszkennelt adatokból is elő lehet állítani a statikus foglaltsági térképet.



4.10. ábra: Tervezett jármű-trajektória (piros) a binarizált foglaltsági rács (sárga) ismeretében

### 4.3 Háromdimenziós környezeti modellek

Az úthálózat háromdimenziós környezetében található épített és természetes tereptárgyak fényképeivel, majd azok pontos referenciával történő elhelyezésével a járművezetők számára képes a térinformatika támogatást nyújtani. A biztonságos közlekedésben fontos szempont, hogy a járművezető teljes figyelmét az útra, a környezetre fordítsa. Ha olyan területen halad, amelyet nem ismer, a navigációt segítő megoldásnak úgy kell működnie, hogy az ne terelje el fölöslegesen a figyelmét; gyorsan átlátható, egyszerű módon kapja meg az éppen szükséges utasítást, visszajelzést. Ilyen minimális figyelmet igénylő megoldásra végeztünk fejlesztést, amely a járművezetőt vizuálisan irányítja (Tóth *et al.*, 2004). A 4.11. ábrán látható, hogy a járművezető számára egy helyszíni fotóra vetített navigációs utasítás jelzi a követendő haladási irányt. A navigáció alapjául szolgáló adatbázis kulcspontokban olyan fényképeket tartalmaz, amely a járművezető szemmagasságából, a lehetséges haladási irányokba néz. A fényképi kulcspontok helyét Leica SR530 geodéziai vevővel határoztuk meg. A navigációhoz szükséges térkép az utcahálózat raszteres topográfiai térképe, valamint annak manuális digitalizálásával létrehozott topológiailag korrekt gráfját jelenti, amelyet AutoCAD Map rendszerben hoztunk létre. A kiszámított útvonalváltozat alapján leválogatásra kerülnek a kulcspontok, majd az egymás után következő javasolt útvonalpontok alapján meghatározható a navigációs utasítás, amely a kulcsponti fényképekre rárajzolásra kerül. A vezetőtámogató alkalmazás Microsoft Visual Basic nyelven készült.



4.11. ábra: Fénykép alapú járművezető segítő rendszer képernyője

A fényképes vezetőtámogató megoldás tehát a térképi és képi adatbázisra támaszkodva a jármű vezetőjének pontos pozíciója birtokában adja meg a könnyen érthető utasításokat, amelyek követésével a járművezető végighaladhat a számára kiszámolt optimális úton. A pontos pozíció meghatározása rendkívül fontos ebben a feladatban. A legáltalánosabb megoldás a műholdas helymeghatározás technológiájának alkalmazása. Ahhoz azonban, hogy a műholdas pozicionálás az elvárt pontossággal elvégezhető legyen, a vevőberendezésnek megfelelő számú és térbeli elrendezésű mesterséges holdat kell „látnia”. Az égbolt láthatóságának mértékét különösen városias körülmények között számos akadály rontja. Ilyen akadályozó tényező az utcákban álló fák, a szűk utcák, amelyekben a magasabb épületek közel kerültek egymáshoz, az alagutak és épületen belüli utak (pl. parkolóházakban).

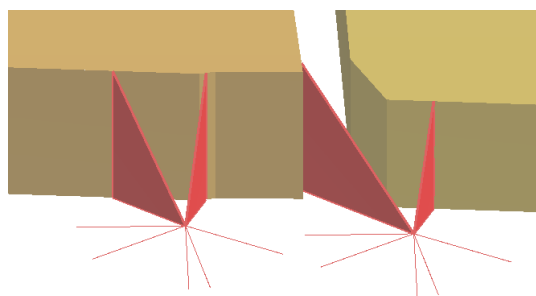
Ezeknek a zavaró tényezőknek az együttesét ún. „urban canyon”-effektusként tartjuk számon. A jelenség tanulmányozására Budapesten a pesti belváros Kossuth Lajos utca – Múzeum körút – Vámház körút – Belgrád rakpart által határolt részén végeztünk járműre szerelt vevővel GPS-méréseket, majd az elemzésre szánt terület városmodelljét hoztuk létre Z/I ImageStation fotogrammetriai munkaállomáson végrehajtott térkiértékeléssel (4.12. ábra).





4.12. ábra: Budapest pesti belvárosában található épületek prizmatikus modellje

A vizsgálatokhoz elegendő volt az utcák mentén az épületek háromdimenziós prizmatikus kiértékelése. A GPS-vevővel mért járműpozíciókban az egyes műholdak részletes adatai voltak elérhetők; ezekből levezettük a holdak azimutját és magassági szögét, mely paraméterek így a városmodellel összelátás-vizsgálatot tett lehetővé (4.13. a ábra). A mérések validálására a vevők által rögzített DOP-értékek (*Dilution of Precision* – DOP, azaz pontosság-hígulás) térképét is levezettük (4.13. b ábra), amely 90% fölötti kapcsolatot igazolt a városmodellből kapott és a mért pontossági adatok között (Lovas, Takács & Barsi, 2003).



a) adott járműpozícióban lehetséges műholdakra menő térbeli irányok elhelyezkedése a városmodellben

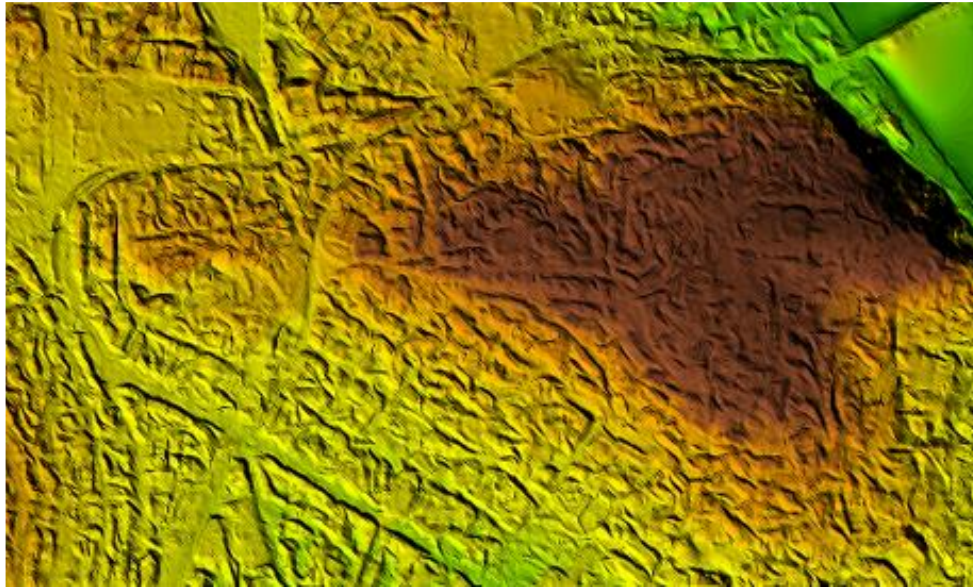


b) DOP-térkép a járműves mérés során rögzített adatokból levezetve

4.13. ábra: Városi körülmények között végzett GPS-mérések elemzése a műholdak láthatósági vizsgálata érdekében

Az említett Z/I ImageStation fotogrammetriai munkaállomáson Budapestről készült 1:30.000 méretarányú, 60 % soron belüli átfedéssel rögzített ~0.8 m geometriai felbontású légifényképekből korrelációs együtthatón és legkisebb négyzetek módszerén alapuló képillesztési (*image matching*) eljárással 3 m szabályos rácsátvolságú digitális felszínmodellt vezetünk le annak érdekében, hogy igazoljuk a digitális légifényképek alkalmazhatóságát a háromdimenziós terepmodell létrehozási folyamatában (Kugler, Ládai & Barsi, 2004; Kugler & Barsi, 2005). Az egyszerű képillesztéssel a felszínmodell kiszámítása speciális hardvert igényelt, amin célszoftverben használt érdeklődési operátor (*interest operator*) jelölte meg a lehetséges pontokat a képpár mind-

két képén, majd a beállításoknak megfelelő korreláció esetén az összetartozó pontokat elfogadva szabálytalan elrendezésű ponthalmaz volt előállítható. A szabálytalan ponthalmaz alapján megfelelő interpolációs technikákkal szabályos domborzati rács számítható (4.14. ábra). Hasonló eredményeket a későbbi fotogrammetriai szoftverek (pl. Erdas LPS) már jelentős hardvertámogatás nélkül is képesek voltak elérni. Ennek a megoldásnak köszönhetően már évtizedekkel ezelőtt elérhető volt a természetes és mesterséges környezeti elemek háromdimenziós rekonstrukciója.



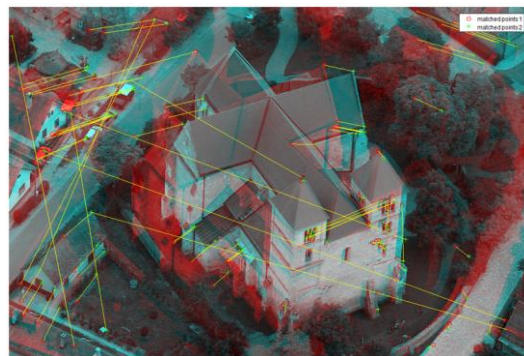
4.14. ábra: Szabályos rács formájú digitális felszínmodell a Gellért hegyről, amelynek előállítása sztereo képekből korrelációs képillesztéssel történt. A modell színezése a földrajzban megszokott módot követi.

Az időközben kifejlődött SFM-technológiának köszönhetően már nem egyszerűen csak két kép illesztésével lehetséges térbeli felületi rekonstrukció, hanem sok kép együttes feldolgozásából összetett alakzatoké is. Kutatásomban ezt több helyszínen, több képkötő eszközzel nyert képállománnyal is tanulmányoztam (Somogyi, Lovas & Barsi, 2017). A módszertan olyan mértékben rugalmas, hogy a képek a legkülönbözőbb eszközökkel készülhetnek (mérőkamerák, amatőr kamerák, okostelefonok, drónos kamerák, orvosi képkötő stb.). A 3D-tárgyrekonstrukció módszerének meglehetősen különleges alkalmazási módja a közösségi képmegosztók felvételeinek kiértékelése (Somogyi *et al.*, 2016).

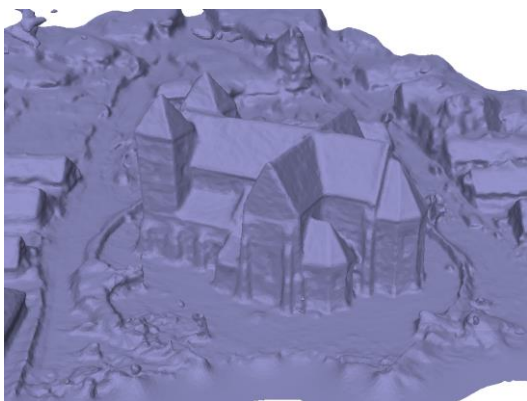
Egyetlen tereptárgy, épület térbeli rekonstrukciójára mutat példát a 4.15. ábra. Az eljárás erejét illusztrálja az is, hogy a YouTube-ról letöltött HD-minőségű (1920 × 1080 pixel méretű), drónról készült körebepülő videó kikockázásával, majd a képkockákra lefuttatott SFM-alkalmazással (*Agisoft PhotoScan*) sikeresen elvégezhető volt a rekonstrukció. A felmérést végző drónt (a vetítési centrumok elhelyezkedése szerint) egy képzetlen amatőr kezelte, így a repülési tengely teljesen véletlenszerű volt. *Mathworks Matlab* környezetben elvégzett saját fejlesztésű megoldásból az elemi lépések (4.15. a és b ábrarész) is nyomon követhetők. A számításokor terepi illesztőpontok megadására, s így globális vonatkozási rendszerben értelmezett elhelyezésre és tájolásra is van mód. Példámban ettől eltekintek.



a) az érdeklődési operátorral megjelölt sarokpontok



b) a szegmentálással kapott pontok párosítása, majd a kép transzformációja a legjobb illeszkedés érdekében



c) a nyers árnyalt térmodell



d) az intenzitásértékekkel textúrázott (önálló pontokból álló) fotorealistikus térmodell

4.15. ábra: SFM-módszerre épülő térbeli rekonstrukció lépései az Ócsai református templom példáján keresztül

Amennyiben a felmérési munka megtervezett repüléssel támogatást kap, a terepen gyűjtött képek szabályos elrendezésben (pl. rácsban vagy kettős rácsban) állnak rendelkezésre. Ekkor nagyobb összefüggő terület kiértékelése technológiailag azonos lépésekből áll, csupán a számításra fordított idő mértéke növekszik meg. Erre a felmérésre látható példa a 4.16. ábrán. Az épületek ilyen „sorozatos” kiértékelésével teljes városrészek vagy városok modellje állítható elő. A korábbi képillesztési technikákkal ellentétben jóval nagyobb részletességgel, ugyanakkor nagy pontossággal végezhető el a feladat. A 4.17. ábrán a kampuszmodell egy kis részlete látható. A pontfelhőből háromszögeléssel előállítottam a felület modelljét; ezeket az elemi háromszögeket is feltüntettem az ábra jobb felén. A kivágathoz az eredeti pontfelhő 499.076 pontját használtam fel, amelyekből 1.000.000 háromszögelemet (*mesh face*) képeztem. Megfigyelhető, hogy a háromszögeléssel létrehozott térmodellben a fák lombjánál az ágak miatt jelentkező nagyon apró részletek nem jönnek ki, azok helyett a jelenlegi algoritmusok simító effektusuk miatt „buborék-szerű” megjelenést kölcsönöznek. A megoldás hátulütője, hogy rendkívül nagy számítási kapacitást követel a végrehajtás. A 4.16. ábrán látható BME kampusz-modell létrehozása számítási felhőben történt, amelyben 59 GB RAM-mal, 2.9 GHz-es két CPU-val rendelkező dedikált virtuális gép 918 darab  $4000 \times 3000$  pixel méretű képet dolgozott fel közel 3.5 óra alatt. Nyilvánvaló, hogy a folyamatos számítási kapacitás-növekedés és a grafikus kártyák (GPU) hatékony bevonásával az elvégzendő számítás ideje erőteljesen csökkenni fog – már a közeljövőben is.





4.16. ábra: A BME történelmi kampuszáról készült drónos fényképezés képeinek feldolgozásából nyert 3D textúrázott városmodell



4.17. ábra: Modellrészlet a BME kampuszának felméréséből. Az ábra jobb felén a háromszöghálót is megjelenítettem.

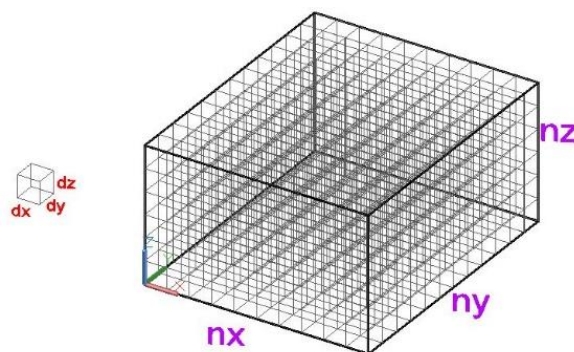
A járművek környezetének háromdimenziós modellje nemcsak optikai kameraképek rögzítésével és feldolgozásával, hanem lézerszkenneléssel is létrehozható. Mind a földi, mind a mobil lézerszkennelés technológiája alkalmas arra, hogy a környezet objektumainak nagy sűrűségű és pontos pontfelhőjét előállítsa, amely a későbbiekben kiindulási adatként szolgálhat. Dolgozatomban földi lézerszkenneléssel felvett adathalmaz részlete látható a 3.21. ábrán, mobil lézerszkenneléssel gyűjtött pontfelhő pedig a 3.26. ábrán található.

A lézerszkenneléssel nyert 3D pontfelhők kapcsán néhány negatív jellegzetességet megállapíthatunk (Potó *et al.*, 2017):

- az adatmennyiség óriási,
- a pontok térbeli eloszlása inhomogén,
- a pontfelhők irreleváns objektumokról is tartalmaznak pontokat,
- a pontfelhők strukturálatlanok.

Ezek szerint a negatív tulajdonságok szerint két lényeges megoldandó feladat áll előttünk: (1) a zajszűrés és (2) a strukturált tárolási forma kidolgozása. Kutatásomban a zajszűrés helyett az adattárolás kérdésével kezdtem foglalkozni. (Wang, Lindenbergh & Menenti, 2015) cikkükben leírják, hogy a már eltárolt pontfelhő újramintavételezésével és a pontok voxelekbe történő rendezésével tárhely és idő szerint hatékony eljárás dolgozható ki. (Ez a voxelmodell esetükben homogén; heterogén változatban hierarchikus tagolás látható például a 4.2. c ábrán). Az általuk fejlesztett megoldás 10-8-5-3 m-es voxelméretekkel újramintavételezett pontfelhő tárolására a tapasztalataik szerint a legjobb geometriai felbontás mellett a hagyományos ~1200 s helyett ~200 s feldolgozási időt és mintegy 14.3%-os adattömörítést kaptak. Ennek a munkának az inspirálására dolgoztam ki a modellezési környezetnek is használt Mathworks Matlab rendszerben a saját tárolási eljárásomat.

A módszerem lényege, hogy a Matlab hatékony ritka (*sparse*) mátrixos adatmodelljét kiterjesztettem háromdimenziósra. A térbeli környezet rögzített méretű voxelek esetében lefedhető egy térbeli ráccsal (4.18. ábra). A rács elemei első megközelítésben attól függően kapják értéküket, hogy tartalmaznak-e lézerszkennelésből származó pontot. Végeredményben a teljes térbeli rácsban csak a szkenneléssel begyűjtött pontok adott méretű befoglaló kockái szerepelnek nemnulla elemekkel. A második megközelítésben a megjelenítés érdekében az egyes kockákba eső szkennelt pontok RGB-színértékeinek átlaga került, így a voxelek színesen is ábrázolhatók. További jellemzők, mint fizikai tulajdonságok (visszaverőképesség, hőmérséklet stb.), vagy tematikus jellemzők (milyen felszínborítottsághoz tartozik a voxel, azon túlmenően milyen épület voxeljéről van szó stb.) szintén tárolhatók, ábrázolhatók.



4.18. ábra: A ritkamátrix alapú adattárolásban használt térbeli rács. A voxelek  $dx$ - $dy$ - $dz$  oldalméretekkel rendelkeznek, így a lefedett térben  $nx \times ny \times nz$  darab voxel keletkezik.

A voxelek méretének, azaz a modell geometriai felbontásának megváltoztatása a reprezentált objektum leírásának minőségét döntő módon befolyásolja. Ennek köszönhetően a modellezés minősége és a 3D voxelmodell használhatósága meghatározó mértékben ettől a paramétertől függ. A modellezésben azonban csupán a felbontás növelésével nem lehet előnyre szert tenni, ugyanis rohamosan nő a felbontás javulásával a



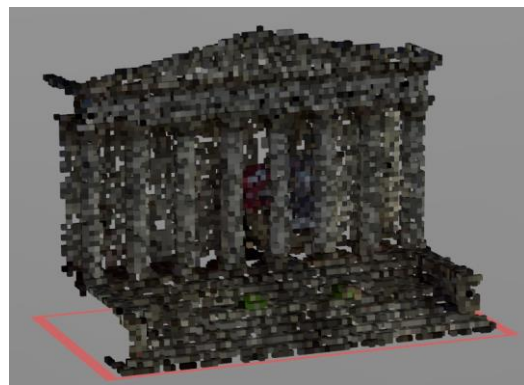
tárolandó adatmennyiség. A teljes tér rácsa a geometriai felbontás függvényében  $n_x \times n_y \times n_z$  méretű adatmennyiséget jelent. Eljárásom a teret voxelrétegekre bontja. Minden réteg vastagsága azonos a voxelek  $z$ -irányú kiterjedésével. A felülnézeti  $x$  és  $y$ -felbontás is azonosak és egyeznek a  $z$ -irányúval.

Egy voxelrétegen belül felfoghatjuk a tárolást úgy, mint egy ritka mátrix, amikor csak azokat az elemeket tároljuk, amelyekben van információ, vagyis a nemnulla voxeleket. A kifejlesztett tárolási modell ezért a pontfelhő pontjainak eloszlásától függően adja meg a nemüres voxelek számát s csak azok kerülnek a háttértárra (Potó *et al.*, 2017).

A Magyar Nemzeti Múzeum épületének homlokzata földi lézerszkenneléssel felmérésre került, majd különböző voxelméreteket mellett ebben a tárolási formában eltároltam (4.19. ábra). A homlokzatról nyert nyers pontfelhő 4.078.389 pontból állt. A 10 cm-es voxelmodell összes nemüres voxeljének száma az eredeti pontmennyiség 5.2%-a. Eljárásom tehát a Wang-féle megoldáshoz képest előbbre lép a hatékonyságban.



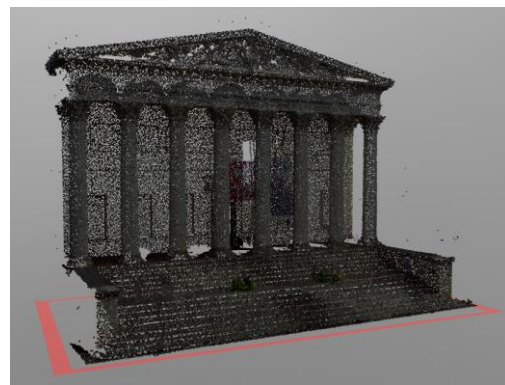
a) 100 cm felbontású, 2869 voxelből álló, 1.1 MB memóriát igénylő modell



b) 50 cm felbontású, 8438 voxelből álló, 3.4 MB memóriát igénylő modell



c) 25 cm felbontású, 46 876 voxelből álló, 18.7 MB memóriát igénylő modell



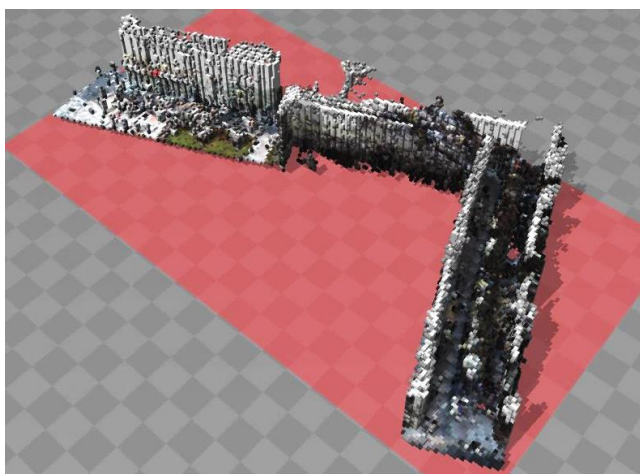
d) 10 cm felbontású, 213 495 voxelből álló, 85 MB memóriát igénylő modell

4.19. ábra: A Nemzeti Múzeum épületének különböző geometriai felbontású modellje

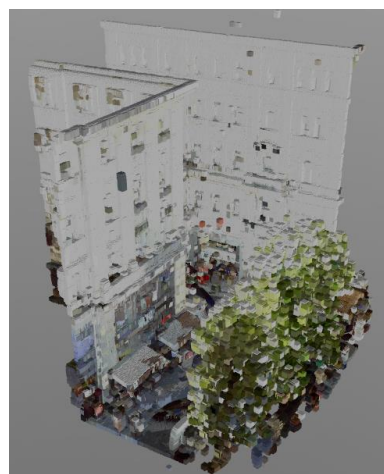
A rétegenként ritka mátrixokból felépített teljes voxelmodell használatára eljárásgyűjteményt implementáltam, amellyel az adatokhoz való hozzáférés, megjelenítés, egyszerűbb elemzés (pl. távolságok kiszámítása) végezhető el.

A 3.2.3. fejezetben már ismertetett budapesti Piarista köz – Váci utca közötti körülbelül 260 m hosszú mintaszakaszon elvégzett vizsgálatokhoz földi és mobil lézerszkennelést végeztünk. 0.5 és 1 m oldalhosszúságú voxelmodelleket állítottunk elő (4.20. ábra); a modellek főbb jellemzői a 4.1. táblázatban olvashatók.





a) mobil lézerszkenneléssel nyert pontfelhőből levezetett 1 m-es voxelmodell; az összes voxelszám: 178 048



b) földi lézerszkenneléssel nyert pontfelhőből levezetett 0.5 m-es voxelmodell részlete; itt az összes voxelszám: 4 443

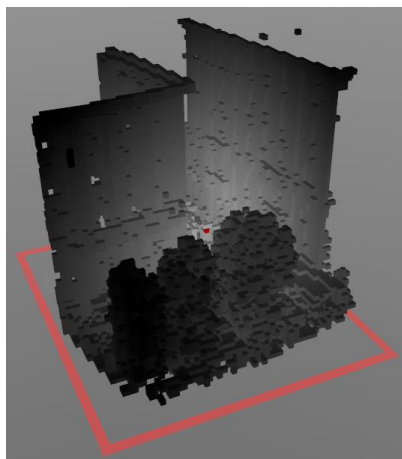
4.20. ábra: Városi beépített környezet modellezése a kidolgozott voxel alapú módszerrel

4.1. táblázat: A fontosabb modellparaméterek a Piarista köz – Váci utca mintaútszakaszra. nx, ny, nz a térbeli rács mérete a voxelek számában, NNEV a nemüres elemek száma, SFR a nemüres elemek aránya az összes rácselemhez viszonyítva

	Földi lézerszkennelés		Mobil lézerszkennelés	
voxelméret [m]	0.5	1.0	0.5	1.0
nx	421	211	428	214
ny	243	122	239	120
nz	71	36	80	40
NNEV	84461	30113	89382	30597
SFR	1.16%	3.25%	1.09%	2.98%

A teszterület alapján látható, hogy (1) a nemüres elemek aránya a felbontás növelésével javul, (2) 0.5 m-es felbontásnál már csak 1% körüli a nemüres cellák száma, azaz hatékony a ritka mátrixos tárolási megoldás, (3) nincs lényegi különbség a földi és a mobil lézerszkennelés által gyűjtött adatok tárolásában. Az SFR értelmezhető úgy is, mintha útfolyóméterenként 116 illetve 325 nemüres cellát kaptunk földi lézerszkennelésre 0.5 illetve 1 m felbontás mellett, így ezzel a megközelítéssel becsülni lehet a felmért terület elem- és memória szükségletét (feltéve, ha a teszterület táblázatbeli adatai reprezentatívnak tekinthetők; további alapos tesztek természetesen még kívánatosak) A voxelméret csökkenésével exponenciálisan növekvő nemüres elemszámot, továbbá lineárisan növekvő memóriahányadot tapasztaltunk 0.98-ot meghaladó korrelációs együttható mellett (Potó *et al.*, 2017).

A levezetett voxelmodell alkalmas akár a jármű helyének meghatározására független módszerrel (4.21. ábra). Egy kísérletben  $\pm 30$  cm-es normális eloszlású zajjal terhelt szimulált járműfedélzeti szkenneres méréssel a jármű helye dm-es pontossággal meghatározhatónak bizonyult (Potó & Barsi, 2017b). A vizsgálatban arra a következtetésre jutottam, hogy a hibaterjedés számítási módszerét alkalmazva a térbeli voxelmodell geometriai paramétereire jó becslés adható előre adott (elvárt) helymeghatározási és tapasztalati távolságmérési pontosság mellett.



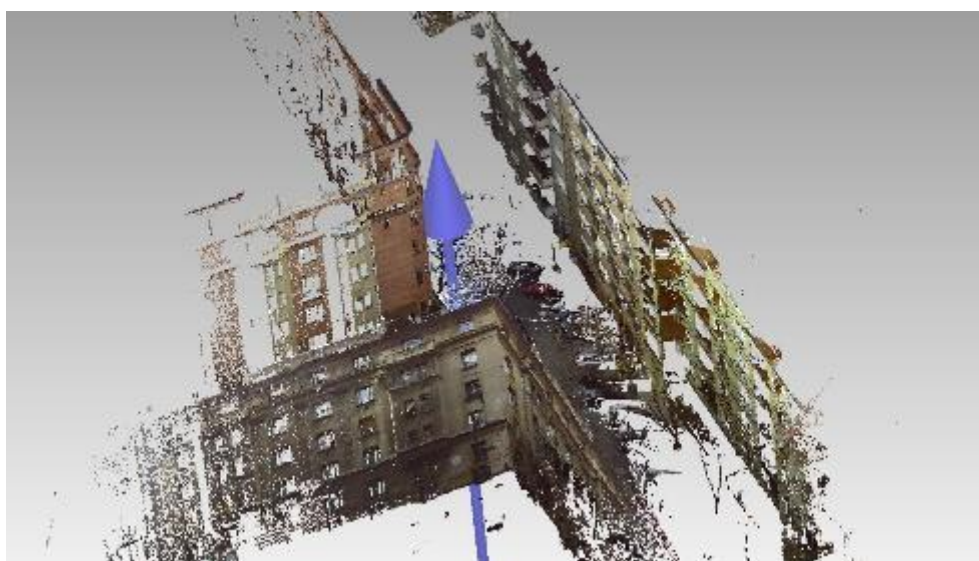
a) a voxelek színezése adott járműpozíciótól vett távolság alapján



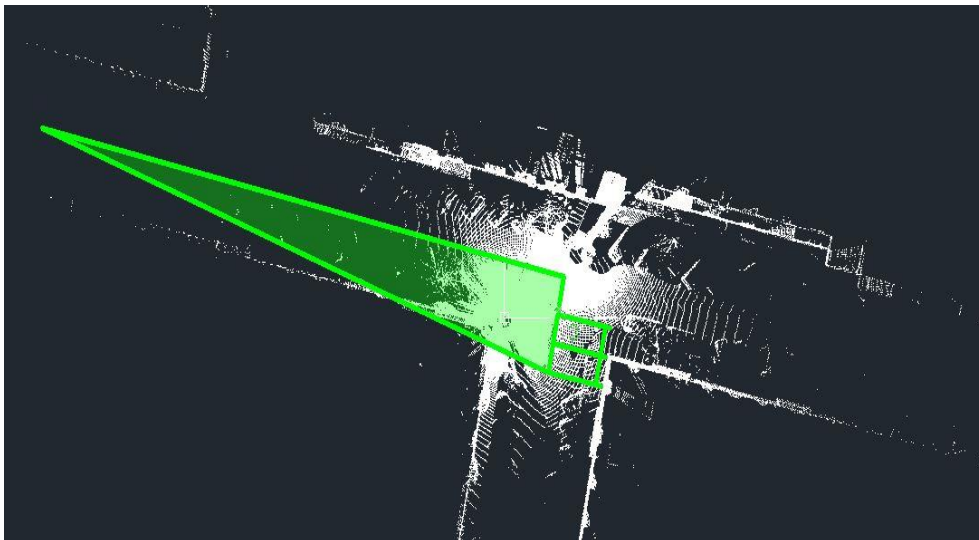
b) modell-metszet adott járműpozícióban függőleges helyzetű, a haladási irányra merőleges síkban

4.21. ábra: Helymeghatározás a levezetett voxelmodell felhasználásával

Az eredeti lézerszkenneres részletes helyszíni mérések alkalmasak arra, hogy lehetséges baleseti helyeket lehet kimutatni, vagy a közlekedés biztonságosságát képesek megállapítani. Az eljárás egy-egy csomópont térbeli, nagy részletességű modelljét állítja elő. Ebben a modellben a járművek, esetlegesen a gyalogosok által belátható területek levezethetők; ráadásul nemcsak egyetlen pontra, hanem például egy forgalmi sávra is. Ekkor a járművezető vélhető szemmagasságában a forgalmi sáv megfelelő helyszínrajzi részén (azaz a vezető fejének térbeli vonalában) megvizsgálható, hogy a csomópontból mekkora terület látható be, továbbá meghatározható, hogy mekkora sebességgel érkező keresztező jármű észlelhető. Ezek a konkrét csomóponti geometriákhoz köthető vizsgálatok eredményezhetik a csomópontot megközelítő járművek sebességének korlátozását, a stopvonal helyének kijelölését, ezzel a közlekedés biztonságának megnövelését. A módszer különös előnye, hogy nem csupán az épületek és útburkolat alapján lehet döntést hozni, hanem tanulmányozható a növényzet (fák, bokrok, dísznövények, kerítések) és a parkoló járművek befolyásoló hatása is.



a) a Vak Bottyán és Lágymányosi utca kereszteződésének földi lézerszkenneléséből nyert pontfelhője

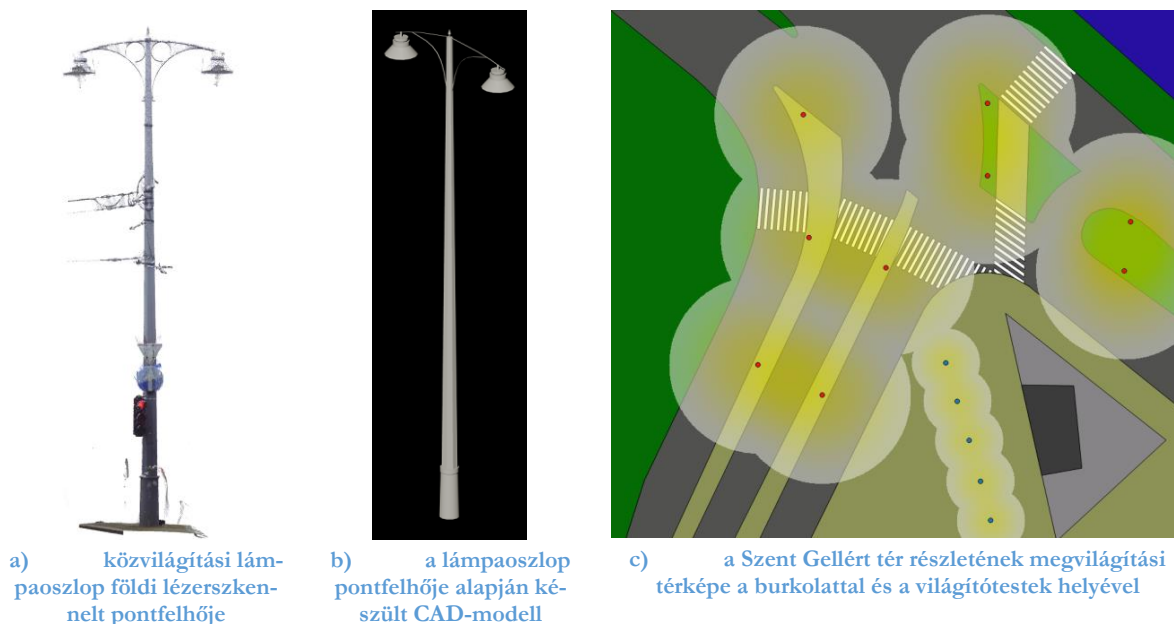


b) a pontfelhő felülnézeti képére szerkesztett beláthatósági háromszög

4.22. ábra: Csomópont beláthatóságának elemzése lézerszkennelt pontfelhő alapján

Szintén a közlekedés biztonsága szempontjából fontosak a közvilágítás eszközei, amelyek megmérésével, majd városmodellbe illesztésével a megvilágítás mértéke elemezhető, esetleges korszerűsítés tervezhető (Molnar *et al.*, 2015). A járművek által kibocsátott kipufogógázok és a szálló por áramlásának, a környezetünkben tapasztalható koncentrációjának numerikus modelljéhez szintén kiválóan használható a térbeli városmodell.

Az egyes lámpaoszlopokat a közvilágítás korszerűsítésekor felmérés alapján megvizsgálják, majd megtervezik az új megvilágítást. Ilyen munka támogatásához földi lézerszkenneléssel lámpaoszlopokat mértünk fel, majd egy-egy tanulmányozott területen a lámpák CAD-modelljeinek (4.23. ábra a és b részei) megalkotásával megvizsgáltuk, hogy a lámpatest magasságából konkrét világító berendezés használatával az útburkolatra mekkora fénytjeljesítmény jut. Ilyen felmérésről és a csatlakozó vizsgálatról a (Molnar *et al.*, 2015) cikkben számoltunk be. A vizsgálatból kapott megvilágítási térkép látható a 4.23. ábra c részén.



a) közvilágítási lámpaoszlop földi lézerszkennelt pontfelhője

b) a lámpaoszlop pontfelhője alapján készült CAD-modell

c) a Szent Gellért tér részletének megvilágítási térképe a burkolattal és a világítótestek helyével

4.23. ábra: Közterület bevilágításának vizsgálata földi lézerszkenneléssel és a megvilágítottság elemzésével

## 4.4 Következtetések, tézisek

Az úthálózat körül elhelyezkedő környezet rendkívül lényeges a felszíni közlekedés szempontjából. Ennek a környezetnek a felmérése, majd a megfelelő modell levezetése a tudományos kutatásban az egyik fókuszfeladat. A felszín közeléből vagy akár repülőgépről, műholdról készült optikai képek feldolgozásából nagymennyiségű információ nyerhető, ehhez hasonlóan információgazdag a különböző platformokon elhelyezett lézerszkennerek által szolgáltatott adat is. Az autonóm járművek kifejlesztése felé haladó műszaki kutatás-fejlesztés ezért nagy várakozással tekinti ezen területek eredményeit. Munkámban ezért én is többféle adatforrás többféle feldolgozási módját tanulmányoztam és dolgoztam ki eljárásokat és összetett technológiákat. Ezeknek az elméleti eredményeknek az igazolására nagyon könnyen rendelkezésemre álló valós adatok feldolgozásával gyakorlati bizonyítékokat igyekeztem előállítani.

**Tézis 3:** Optikai és lézerszkenneléses távérzékelési módokat dolgoztam ki úthálózat környezetének nagyfelbontású és nagy pontosságú térképezésére.

Az altézisek a felszínborítottsági térképek új előállítási technikáját adják meg nagyfelbontású űrfelvétel (Quickbird) és teljes hullámalakos légi lézerszkennelés adatainak kiértékelésével. Ennek a feladatnak az elvégzésére a mesterséges neurális hálózatok adaptációját végeztem el. A földi és mobil lézerszkennelés módszerével előálló térbeli pontfelhő geometriai és intenzitásadatainak felhasználásával igazoltam, hogy alkalmassak borítottsági térképezésre. Ennek a gyakorlati megvalósulásában a járműirányításhoz igényelt foglaltsági térképnek a statikus változatát vezetem le saját technológiával.

A háromdimenziós környezeti leírás digitális domborzatmodellek, épületmodellek előállításán keresztül érhető el. Ebben a munkafolyamatban újfajta képfeldolgozási módszertanok (SFM és MVS) bevonásával, továbbá hatékony voxeles tárolási, megjelenítési és ráépülő helymeghatározási technológiát fejlesztettem. Az altézis tartalmazza továbbá a közlekedésbiztonság szempontjából lényeges beláthatóság és megvilágítás elemzéseit, az ezekhez nélkülözhetetlen objektummodellezéssel együtt.

A fejezet kutatásában segítségemre voltak jelenlegi és korábbi diplomázóim, Gáspár Katalin, Potó Vivien és Tar László, továbbá egykori és jelenlegi doktoranduszaim, Kugler Zsófia, Molnár Bence és Potó Vivien, valamint egykori doktorandusz, jelenleg kollégám Somogyi József Árpád. Neuberger Hajnalka doktorandusz kollégám jelenleg értekezésén dolgozik, akivel szintén projektszinten dolgoztam a környezet térképezésén.



## 5 Közlekedő objektumok távérzékelése és térinformatikája

### 5.1 Bevezetés

A távérzékelés 1966-ban még a „távolról történő (katonai) felderítés” tágabb értelmű fogalmát jelentette (Campbell & Wynne, 2011). A mára széles szakmai körben elfogadottá vált definíció szerint pedig „a Föld szárazföldjeinek és vizeinek felületéről történő információ levezetésének azon gyakorlata, amely felülnézetből, az elektromágneses spektrum egy vagy több tartományában megfigyelhető, a felszínről visszaverődő vagy azáltal kibocsátott sugárzás felhasználásával készült képekkel foglalkozik.” (Campbell & Wynne, 2011).

A fotogrammetriát az Amerikai Fotogrammetriai és Távérzékelési Társaság (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* – ASPRS) 2004-ben megjelent kézikönyve az alábbiak szerint határozza meg: „A fotogrammetria művészet, tudomány és technológia, ami a fizikai objektumokról és a környezetről megbízható információt állít elő fotográfiai felvételek és elektromágnesesen sugárzott energia mintázatának rögzítése, mérése és kiértékelése által” (McGlone, Mikhail & Bethel, 2004)

A két fenti meghatározás után érthető, hogy sokan a két területet átfedőnek, esetenként a fotogrammetriát a távérzékelés részének tekintik. Mindkét terület közös vonása, hogy képek elkészítésén keresztül történik az információgyűjtés, a lézerszkennelést pedig mindkét terület művelői saját eszköznek tekintik.

A térinformatika adatszámításának megfelelően a távérzékelés geometriai és attribútum tulajdonságok meghatározására képes pontszerű, vonalszerű és felületszerű objektumok esetén. Az adatnyerés idején a felszín megvilágításához felhasználhatjuk a Nap energiáját – ez a passzív távérzékelés –, de saját sugárforrás használata mellett, aktív távérzékeléssel, pl. radarral is gyűjthetünk adatokat. A közvetítő elektromágneses sugárzás szerint látható (optikai) és nemlátható (nem-optikai) tartományú módszereket különböztetünk meg; a mikrohullámú távérzékelés például az utóbbi csoport fontos tagja. A technológiákat továbbá osztályozhatjuk az érzékelők geometriai, radiometriai, spektrális és temporális felbontása alapján – ahogy a digitális képeket általánosan jellemezni szokás. Példa gyanánt említem meg a nagyfelbontású űrfelvételeket (geometriai jellemzés; ez manapság a ~0.3-1.5 m pixelnagyságra illik), a multi- és hiperspektrális felvételeket (4-10, illetve sokszáz független spektrális csatornát tartalmazó képek), valamint a monitoring célokra használatos (távérzékelési léptékben) nagyfrekvenciájú (pl. néhány óra és néhány nap közötti ismétlési idejű) űrfelvételeket.

A 4.1. fejezetben már említett NCRST konzorcium nagyon fontos kutatási területe volt a forgalmi adatok (*Flow*) gyűjtése. Ebbe a körbe tartoznak a közlekedő járművek, valamint a gyalogosok is. Ebben a fejezetben az ezirányú tudományos kutatásaim módszereit és eredményeit mutatom be.

A közlekedő járművek érzékelése már régóta a forgalommal foglalkozó szakemberek kiemelt feladata. (Lovas, 2004) szerint a fontosabb hagyományos adatnyerési eljárások a manuális forgalomszámlálás és a hurokdetektorok alkalmazása; a távérzékelés körébe tartozik a légifényképek, a műholdképek, valamint a Lidar és radar eszközök használata.

A távérzékelésben megkülönböztetjük az érzékelést (*sensing*) a felismeréstől (*detection*). Például elektromágneses sugárzást tudunk érzékelni és képek formájában rögzíteni, majd a következő lépésben a feldolgozás során ismeri fel az egyes objektumokat manuálisan egy operátor, vagy automatikusan egy számítógépes algoritmus. Ennek megfelelően az (objektum)felismerést magasabb szintű tevékenységnek tekintem a (jel)érzékeléshez képest.

Az Európai Unió 6. keretprogramjának Safespot projektjében részt vettünk az Infrasens, azaz infrastruktúra oldali érzékelés munkacsoportjának munkájában. Ez a csoport a forgalomban haladó járművek érzékelésére a következő megoldásokat gyűjtötte össze (Safespot Consortium, 2010):

- pneumatikus cső,
- mágneses érzékelők (pl. hurokdetektorok),



- elektromos és elektromágneses érzékelő,
- mikrohullámú radar, Doppler-radar,
- optikai, infravörös vagy ultraibolya videóképfeldolgozás,
- passzív és aktív infravörös érzékelő (utóbbi lézer radar),
- hang- és ultrahang alapú érzékelő,
- mikroelektromechanikus (MEMS) érzékelő,
- kémiai érzékelő,
- kombinált érzékelő.

A kombinált érzékelőre jó példa a projektben kifejlesztett vezeték nélküli érzékelőhálózat (*wireless sensor network* – WSN), ami piezo- és hangalapú érzékeléssel képes járműveket detektálni.

(Sullivan, Worrall & Ferryman, 1995) személyautók geometriai változékonyságának elemzésére sajátérték alapú módszert használtak. Eljárásukban 6 levezetett paraméterből főkomponens transzformációval háromra egyszerűsítették a feladat dimenzióját, amelynek központi eleme egy rugalmas (deformálható) járműmodell volt. (Ruskone *et al.*, 1996) hierarchikus modellt javasolnak nagyméretarányú légifényképeken történő járműdetektálásra. A hierarchia 4 szinten jelentkezik: pixel, jármű, vonal és metavonal. Előbbi kettő az alacsonyabb szintű képfeldolgozási eljárásokkal, utóbbi kettő magasabbrendű műveletekkel támogatott. Megoldásuk úttörő-jellegét a négyrétegű teljes-összekötöttségű perceptron hálózat jelentette, amelyet jármű és nem-jármű kategóriákra tanítottak. Százezer epoch után közel 95%-os felismerési pontosságot értek el. (Hinz, Kurz, *et al.*, 2001) monokuláris kalibrált és tájékozott képekből határoznak meg magassági információt. Szintetikus és valós adatokkal egyaránt tesztelték megoldásukat. 30-100 cm-es pontosság mellett megállapították, hogy személyautó, teherautó és épület között ezzel a módszerrel különbséget lehet tenni. (Tao Zhao & Nevatia, 2001) alacsony felbontású felvételeken az emberi járműérzékelés tanulmányozása után a járművek 3D-s hálós reprezentációját vizsgálták, majd azok árnyékát és szélvédőjüknek elhelyezkedését találták fontos paraméternek. Nagyméretarányú képekre dolgozott ki detektálási megoldást (Hinz & Baumgartner, 2001); ebben a törekvésükben a kontextust (főként más járművek és más objektumok elhelyezkedését) figyelembe veszik. Hinz később olyan kiértékelő algoritmust fejlesztett, amelyben geometriai (pl. közel konstans szélesség, megfelelő hossz) és radiometriai (pl. hossztengelyre vett szimmetria, színhomogenitás) tulajdonságok egyesítésével lokálisan (járművek egyenként) és globálisan (járműsorok) nyerte ki a szükséges információt (Hinz, 2003). Értekezése egyébként kiváló áttekintést ad a témáról (Hinz, 2004). Jelentős előre lépésnek tekinthető (Priyadharshini, Vishnupriya & Saranya, 2013) munkája, amelyben dinamikus Bayes-hálót és gráf-vágást használnak a detektálás során, továbbá a járműosztályozást SVM-technikával oldják meg. Eljárásuk nagytömegű adat (pl. videók) automatikus kiértékelésében használható eredményesen. Ugyanígy jelentős (Xiao *et al.*, 2016) cikke, amely mobil lézerszkenneléssel nyert pontfelhőkben ismerik fel az út szélén parkoló járműveket, majd tudják azokat osztályozni, esetleg korábbi állapothoz képest a változást megállapítani. Kidolgozott módszertanuk elvi alapja a korábban is használt deformálható járműmodell, esetükben az *Active Shape Model* (ASM). Felismerésben 95%, osztályozásban 86% és változásdetektálásban 98% pontosságot értek el. (Koppanyi *et al.*, 2012) cikkükben a járművek megfigyeléséhez a GSM hálózatot használták fel. Eljárásukban a járműveken megtalálható mobil eszközök hálózat-oldali megfigyelésére alapoztak.

A gyalogosok detektálására (Cessford & Muhar, 2003) a következő módszereket különbözteti meg:

- gyalogosszámlálás – megfigyelő személyzet adott helyen kézzel elvégzett számlálása,
- videó rögzítése – helyszíni adatgyűjtést követő későbbi (off-line) feldolgozás,
- távérzékelés – távérzékelte adatok utófeldolgozása,
- mechanikai berendezés – számlálókápu alkalmazása,

- nyomásérzékelés – lépések hatására bekövetkező nyomásváltozás érzékelésére szolgáló eszköz üzemeltetése,
- szeizmikus érzékelő – felületi rezgések érzékelésére útpályába épített szenzorok használata,
- aktív optikai érzékelők – fénysugár útjának gátlását érzékelő rendszer használata,
- passzív optikai érzékelők – kibocsátott infravörös mintázat érzékelése,
- mágneses érzékelők – fémtárgyak elhaladásának kimutatására alkalmas módszer alkalmazása,
- radar – visszaverődő rádióhullámok érzékelése.

(Havasi, Szilávik & Szirányi, 2007), valamint (Leibe, Seemann & Schiele, 2005) statikus képekből fejlesztett gyalogosérzékelő megoldást, (Sabzmejdani & Mori, 2007), (Walk *et al.*, 2010) és (Arpad Barsi *et al.*, 2016) videófelvételek kiértékelése révén kaptak ilyen információkat. Lézeres technika járművekbe történő integrálása által (Fuerstenberg & Lages, 2002) és (Gidel *et al.*, 2010) hozott létre olyan megoldást, amely gyalogosok detektálására volt képes. (Benedek, 2014) forgólézeres rendszert használt gyalogosok detektálására, míg (Gate & Nashashibi, 2008) a gyalogosok osztályozására fejlesztett rekurzív technikát. Biztonsági kamera képének feldolgozásával (Kisfaludi, 2004) adott gyalogosérzékelési megoldást. A gyalogosok mozgásának leírásáról (Bauer & Kitazawa, 2010) és (Shao *et al.*, 2007) közleményeiben olvashatunk; előbbi két szinkronizált szkennert használt. Shao a mozgás periodicitásán alapuló járásmodellt alkotott meg.

## 5.2 Járműdetektálás és -modellezés

A távérzékelés segítségével a nagyból kicsi felé haladás elvét követve először a nagyobb magasságból, a közlekedő járműfolyam vizsgálatát tárgyalom. A járműfolyam esetében csak a haladási irányok, a járművek sebessége, az úton tapasztalható sűrűségük számít, az egyes járművek, azok kategóriájának (pl. személygépkocsi, autóbusz) megállapítása, esetleges pontos jellemzésük nem.

Ilyen távérzékelési alkalmazás a forgalomfigyelés különféle platformokról. Ha csak egyetlen időpontban van szükségünk a járművek forgalmi adataira, az űrtávérzékelés megfelelő lehet. A nagyfelbontású űrfelvételek már vannak annyira fejlettek – elsősorban a geometriai felbontásuknak köszönhetően –, hogy fel lehet ismerni az úton haladó járműveket (5.1. ábra). A Quickbird műholdas szenzora pankromatikusan 65 cm, multispektrálisan pedig 2.62 m pixelméretet biztosít, színmélysége 11 bit (Satellite Imaging Corp, 2017). A viszonylag új, 2016 novemberében pályára állított DigitalGlobe WorldView-4 műholdas platform 617 km magas pályán kering és 31 cm terepi felbontással képes a képeit elkészíteni (DigitalGlobe, 2017).

Ezek a pixelméretetek már lehetővé teszik a járművek megkülönböztetését az úttól, esetenként sikeres osztályozásra is felhasználhatók, azaz egy pillanatkép formájában, a járművek megszámlálásával jellemezhetjük a forgalmat. A műholdak visszatérési ideje 3 nap, ami forgalomfigyelést nem tesz lehetővé, de megközelítő állapot meghatározását igen.



5.1. ábra: 2005. október 13-án készült Quickbird-felvétel Budapestről, az M3-as autópálya kivezető szakaszáról

A nagyvárosok erős forgalmának jobb szabályozása érdekében állandóan keresik a pontosabb, részletesebb adatgyűjtést, ami ugyanakkor gazdaságosan működtethető. Ez az erőfeszítés indította el az EU INTAS programjában a nagyvárosi úthálózat távérzékeléses monitoring programot. A projekt koordinátora, a német *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) már 2005 augusztusában a Kölnben rendezett Katolikus Ifjúsági Világtalálkozó alkalmával (1.2 millió résztvevő!), majd az egy évvel később megrendezett Labdarúgó Világbajnokság alkalmával Stuttgartban (52 ezer néző), Kölnben (45 ezer néző) és Berlinben (72 ezer néző) használt repülőgépes, ballonos és helikopteres forgalomfigyelést. Az akkor kidolgozott ANTAR-kamera-rendszer szolgált a nagyvárosi forgalomfigyelés alapjául. A projektben főként Moszkva, de néhány teszt erejéig Varsó megfigyelése számára látható és infravörös tartományban működő kamerákat kellett méreteznem, a megfelelő objektíveket kiválasztanom, valamint a DLR-nél meglévő GPS/INS rendszer használatával elérhető pontosságot kellett megállapítanom. A városi megfigyelő rendszer közel 350 m relatív repülési magasságból 30 cm-es felvételeket készít mintegy 3-4 órán keresztül, közben a földi egység számára rádióval valós időben továbbítja a képeket. A hordozó platform egy 1250 m<sup>3</sup> térfogatú, 34 m hosszú és 8.5 m átmérőjű AU-12 típusú ballon. A ballon akár álló helyben is tud maradni, ami előnyös a forgalomfigyelés szempontjából. A kezeléséhez csupán egy pilótára van szükség; a maximális hatótávolsága 350 km.



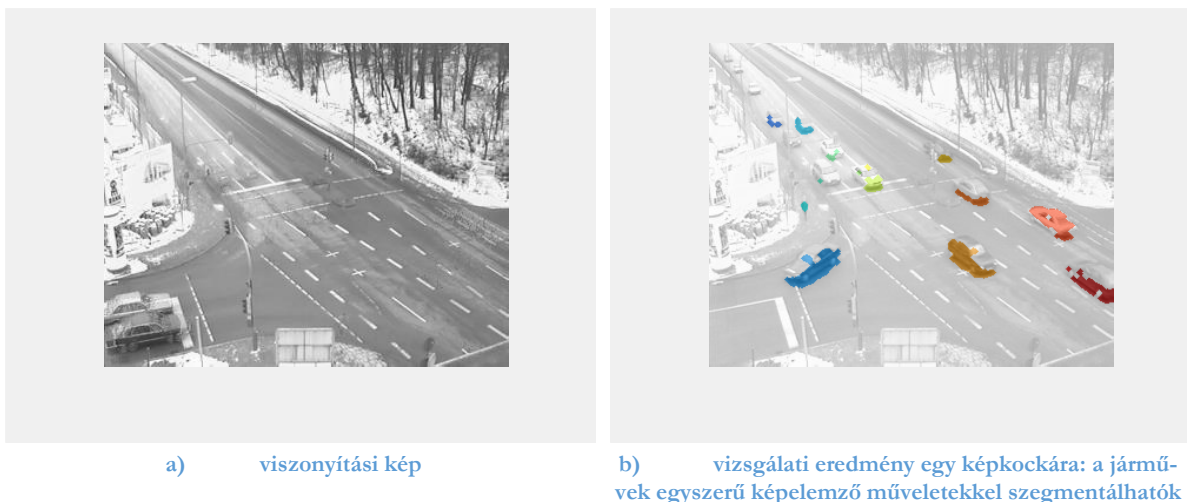
5.2. ábra: Az INTAS-projektben nagyvárosi forgalomfigyelésre kidolgozott távérzékelési rendszer; Moszkva utcahálózatában pirossal a kiemelt jelentőségű megfigyelési szakaszokkal

A kamerarendszer látható fénytartományú tagja egy Dalsa 1M28-SA egység volt, amely  $1024 \times 1024$  pixel képméretű, 27 fps gyakoriságú felvételezést tesz lehetővé. A közeli infravörös hullámhosszra érzékeny VarioCam kamera ezzel szemben  $320 \times 240$  pixel képméretű, 50 fps gyakoriságú képalkotásra képes. A platform lassú mozgása akár sztereó képalkotást is eredményezhet. A hely- és helyzetmegadásra az Applanix POS-AV rendszer szolgál, amellyel tapasztalataink szerint DGPS szolgáltatással és utófeldolgozással 5-30 cm pozícionálási pontosságot, valamint  $0.008-0.015^\circ$  helyzeti pontosságot nyújt. A fedélzetről 2.3 GHz-es rádióval UDP-protokollal történt a képek felszíni továbbítása.

Az utak mellé oszlopokra, épületekre elhelyezett forgalomfigyelő kamerák szintén a távérzékelési adatnyerés témakörbe tartoznak. Ezekkel az eszközökkel nagy térbeli pontossággal és időbeli felbontással (frekvenciával) lehet meghatározni a vizsgált útszakasz forgalmi állapotát. Elterjedt eljárás a kameraképekből egy viszonyítási állapot levezetése, majd annak kivonásával az éppen vizsgált képen látható eltérések formájában jelölhető járművek kimutatása, megszámlálása, sebességük meghatározása, követési idejük levezetése. Az 5.3. ábrán látható viszonyítási kép segítségével az alábbi összefüggésnek megfelelően lehet a járműveket szegmentálni:

$$(I_r < I_a - \Theta) \vee (I_a + \Theta < I_r) \quad (22)$$

ahol  $I_a$  az éppen elemzett kép(kocka),  $I_r$  a viszonyítási kép,  $\Theta$  az intenzitásérték előre beállított küszöbe. A fenti két küszöböléssel az elemzett képre bináris eredménykép jön létre, amelyek egyesítése a logikai VAGY operátorral történik. A végeredmény szintén bináris kép, amelynek igaz állapota az előtérnek (azaz a járműveknek), hamis állapota pedig a háttérnek felel meg. Az eljárás használható színes felvételek esetében is a megfelelő általánosított küszöböléssel. A zajos találatok eltávolításában a képmorfológia eszköztára nyújt megoldást, az összetartozó pixelcsoportokat a *connected components labelling* eljárása foglalja össze.



5.3. ábra: Forgalomfigyelő kamera képsorozatának feldolgozása járműazonosításra. A képek az MVTec Halcon képfeldolgozó szoftverkörnyezet mintaállományaiból származnak (MVTec Software GmbH, 2018), feldolgozásuk Matlab környezetben történt.

A forgalom figyelésére az újabb fejlesztésű eszközök is alkalmasak lehetnek. Ennek kipróbálására egy akciókamerát teszteltünk; az SJCAM SJ4000+ típusjelű kamera 2.99 mm fókusztávolságú objektívvel,  $170^\circ$ -os látószöggel és 2K ( $2048 \times 1080$  pixel) felbontással, SD-kártyára rögzíti a videót. A teszt során kb. 5 perc hosszúságú digitális adatfolyam mintegy 560 MB volt mp4 formátumban. A kamera objektívje jelentős párnatorzításának eltüntetéséhez kamerakalibrációt hajtottunk végre szokásos sakktáblamintás eljárással (Rufli, Scaramuzza & Siegwart, 2008). A számításokat Matlab környezetben végeztük el.

A könnyebb és gyorsabb teszteléshez a kamera eredeti fullHD ( $1920 \times 1080$  pixel) felbontásban rögzített videófilmjét 360p ( $640 \times 360$  pixel) felbontásra redukáltuk. A képkockákat a kalibrációból megkapott paraméterekkel korrigáltuk, majd kiértékeljük. A tesztekre Budapesten négy helyszínt választottunk: a Szentendrei úton (a formátum és kamerabeállítások tesztelésére), illetve az Egér úton, a Hűvösvölgyi úton és a budai alsó rakpart Műegyetem előtti lejtőjénél (Szele, Barsi & Kisgyorgy, 2016).

A járműdetektálásra az egyszerű küszöbölés (vö. 5.3. ábra) helyett adaptív háttérkinyerést alkalmaztunk. Az adaptív eljárás alapja a *Gaussian Mixture Model* (GMM) volt (Stauffer & Grimson, 1999; Kaewtrakulpong & Bowden, 2001), amelyben az eljárás elején 50 képkockából ún. tanulási folyamat során állapítottuk meg modellparamétereket. A modellben a kép pixeljeiről feltételeztem, hogy intenzitásértékei több normális eloszlás keverékét tartalmazzák. A normális eloszlás valószínűségi sűrűségfüggvényéhez intenzitás-átlagokat és kovariancia-mátrixokat kell meghatározni, de a gyors számítás érdekében az implementált Matlab-változatban a kép sávjaira azonos szórásértékeket tartalmazó diagonálmátrixot használtam. Az adaptivitást a tanulási képkockák alapján, mint „pixel-folyamat”-ból levezetett tanulási paraméteren (*learning rate*) keresztül meghatározott súlyok jelentették. Az így előálló keverék-modellbe beleillő pixelek háttérként, a nem beleillő pixelek előtérként osztályozódtak. Az előtér esetünkben a megfigyelni kívánt járművek voltak. Az így előálló bináris foltok (a *blob*-ok) további képfeldolgozási művelettel (pl. morfológiai operátorokkal) simíthatók, szűrhetők voltak, végül a nagyobb értelmezési pontosság érdekében az egymás után következő képkockák alapján dinamikus folyamatnak tekintve a járművek viselkedését, Kálmán-szűrővel simított trajektóriát vezettem le (Szele, Barsi & Kisgyorgy, 2016).



a) járműfelismerési teszt a Szentendrei úton készült videó korrigált képkockáival. A felismert járműveket zöld befoglaló téglalapok jelzik.

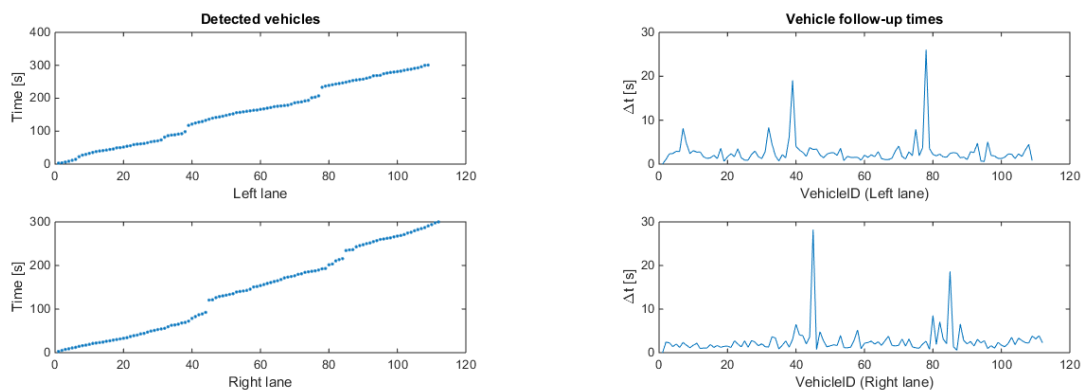


b) a Budai Alsórakpart lejtőjénél készült korrigált videó feldolgozásából kapott Kálmán-szűrővel simított trajektóriák kezdő és végpontjai

5.4. ábra: Akciókamera felvételsorozatának felhasználásával azonosított járművek

Az akciókamerás megfigyelés legnagyobb előnye az olcsó és egyszerű érzékelés megvalósítása a költséges „profí” forgalomfigyelő kamerákkal, kamerarendszerekkel szemben. Az akciókamerák lehetőséget biztosítanak arra is, hogy eseti forgalomfigyelést hajtsunk végre; mobilitásuknak csak a felerősíthetőségük szab határt. A levezetett forgalmi jellemzőkre az 5.5. ábra mutat példát.



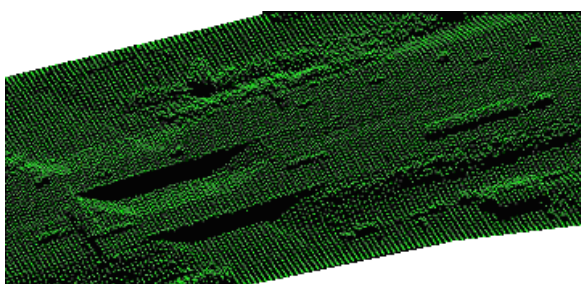


a) az Egér úti tesztén tapasztalt jármű-eloszlások grafikonja a bal és jobb forgalmi sávokra. A vízszintes tengelyen az egyedi járműazonosítók, a függőleges tengelyen az észlelési idők láthatók.

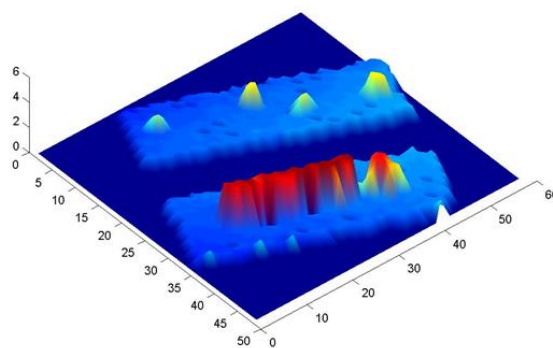
b) a járművek követési ideinek grafikonja a bal és jobb forgalmi sávokra. Jól látható a két kiugró túsze szerint a jelzőlámpák ciklusideje.

5.5. ábra: Levezetett forgalmi jellemzők akciókamerák képsorozata alapján

A járműdetektálás megvalósítható aktív távérzékelési módszerrel, mint például lézerszkenneléssel is. A légi lézerszkennelést gyakran használják sávtérképezésre (*corridor mapping*); egyik tipikus alkalmazása a vonalas létesítmények, így utak megvalósult vagy tervezett nyomvonala mentén végzett felmérés. A lézerszkennelés azonban nem pusztán a terep elemeit pásztázza végig, a mérések kiterjedtek az utakon haladó járművekre is. Ezért helyezte a kutatás fókuszába az NCRST konzorcium Flow csapata, akiktől együttműködési formában adatokat kaptunk. 2000-ben a 35-ös autópálya (US Route 35) Ohio állambeli szakaszán Dayton mellett 470 m-es relatív repülési magasságból 56.6 m/s sebesség mellett nadír irányban és attól  $\pm 6^\circ$ -os nyílásszögben 10 kHz-es lézerkibocsátási frekvenciával tesztmérést végeztek. A keletkezett pontfelhő átlagosan 1.5 pont/m<sup>2</sup> sűrűségű volt (Lovas, 2004). Az 5.6. a ábrán látható egy pontfelhő részlet, amelyen a repülés irányába tartó járművek (alsó útpálya) megnyúlnak, míg a repüléssel szembehaladók (felső útpálya) megrovidülnek. A sima útfelülethez képest a járművek – mint egyfajta „zavarok” – lokális lejtésváltozás vagy szórás kép (5.6. b ábra) levezetésével automatikusan szegmentálhatók (Lovas, 2004; Rakusz, Lovas & Barsi, 2004). Utóbbi előállításához 3×3-as futóablakba eső magasságértékek szórását kellett kiszámítani.



a) a megjelenített pontfelhőn jól felismerhetők az útfelület, a híd, az útmenti növényzet, valamint az úton közlekedő személygépkocsik és a kamion



b) a szórás kép kiváló eszköz a járművek automatikus szegmentálására, mivel az útfelület lokális egyenletlenségeiként éppen a járműveket mutatja ki

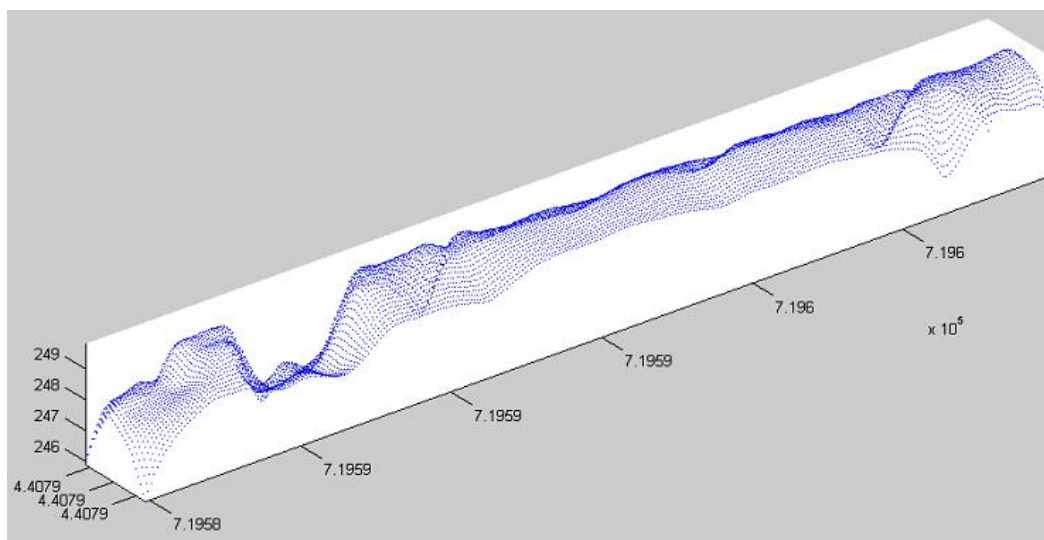
5.6. ábra: Járművek és detektálásuk a 35-ös autópálya Ohio állambeli szakaszáról készült légi lézerszkennelt pontfelhőben

Ennek a jármű-lehatárolásnak folytatásaként forgalmi jellemzők is levezethetők: adott hosszúságú útszakaszon megtalálható járműszám, járműsűrűség, átlagos követési távolság stb. További lehetőséget az egyes

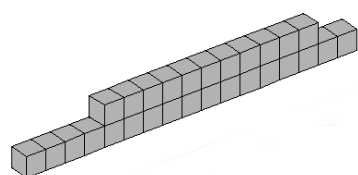


járművek finomabb elemzése jelenti, kamionoknál például az eredeti hosszuk ismeretében akár a sebességük is becsülhető.

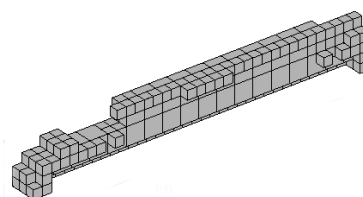
A járművek pontosabb leírása térbeli modell megalkotását igényli. Az egyik lehetséges megközelítési mód a szegmentált pontfelhőre illeszkedő voxelmodell kialakítása. Ekkor a 4.2 fejezetben leírt épületmodellezésben már ismertetett nyolcasfa (4.2. ábra c rész) eljárása alkalmazható. Ennek bemutatására az 5.7. ábrán fokozatos közelítéssel mutatom be egy kamion modelljének létrejöttét. A modellezési folyamatban az egymás után következő rétegeken a voxelek abban az esetben bomlanak tovább, ha a bemeneti pontfelhő alapján további finomabb részletek megkülönböztetésére van szükség. Ez a járműtest belsejében meghagyja a nagyobb méretű voxeleket, a jármű felülete közelében pedig fokozatosan egyre kisebb voxelméretet alkalmaz (Lovas *et al.*, 2005).



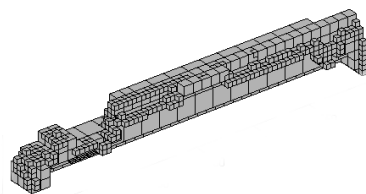
a) a kamion pontfelhője, ahogy a szegmentálással nyert foltból lehatárolással kivágásra került. Az eredeti pontfelhőből 1 dm pontsűrűsége interpolált szabályos pontfelhő állt elő. Az elvileg lehetséges voxelszám  $300 \times 25 \times 46$ , azaz 345.000 darab voxel.



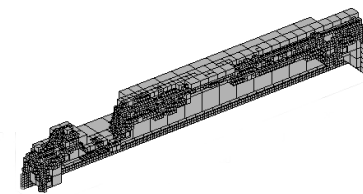
b) a jármű 1. szintű modellje



c) a jármű 2. szintű modellje



d) a jármű 3. szintű modellje

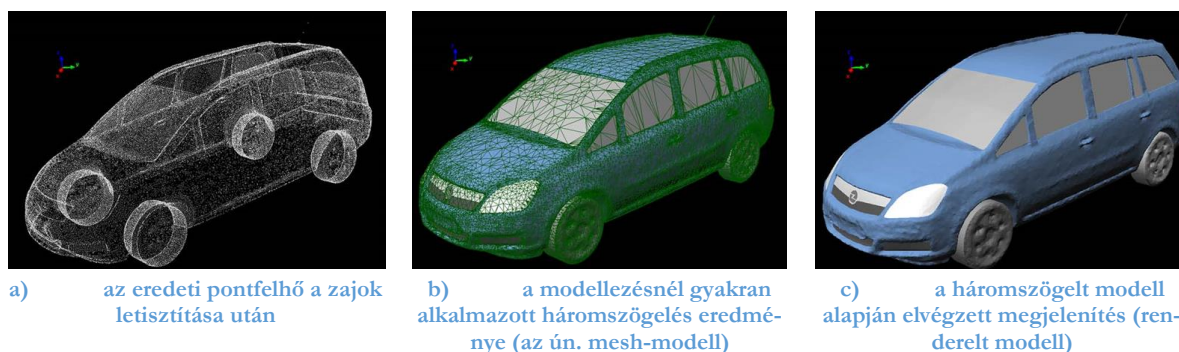


e) a jármű 4. szintű modellje

5.7. ábra: Kamion modellezése légi lézerszkennelésből nyert pontfelhő alapján az első néhány felbontási szinten (Lovas *et al.*, 2005)

A nyolcasfa alapú algoritmus kapcsán érdemes megjegyezni, hogy a fokozatos finomítás helyett számítástechnikailag gyorsabb és egyszerűbb a fordított eljárási mód követése: az eredetileg legkisebb voxelméretű kockák folyamatos aggregálásával logikai műveletek révén teszünk szert a magasabb voxelpiramis-rétegekre (Lovas *et al.*, 2005). Amennyiben az egyes voxelrétegek tárolására az épületmodellezésnél hasonló ritka mátrixos megoldást használunk, igen hatékony memória-kezeléshez jutunk.

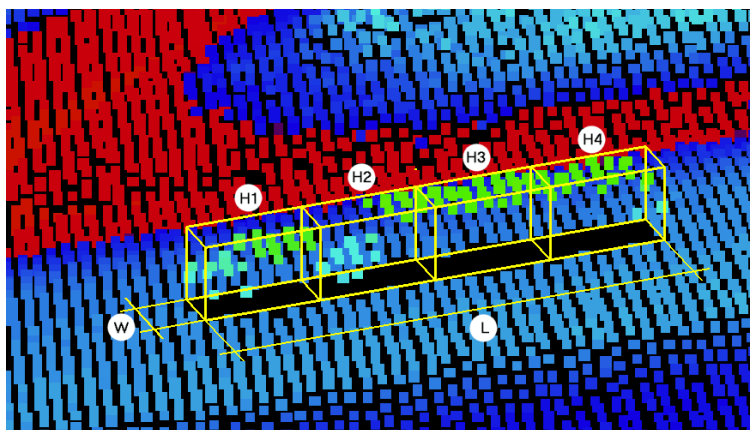
A földi lézerszkennelés nyilvánvalóan a kisebb műszer-tárgy távolságnak és a nagy geometriai felbontásnak köszönhetően nagyságrendekkel finomabb járműmodelleket képes eredményül szolgáltatni. Az 5.8. ábrán földi lézerszkenneléssel készített járműmodell előállítási fázisait lehet látni.



5.8. ábra: Egy Opel Zafira személygépkocsi földi lézerszkennelés alapú modellezése (Kovács, 2005)

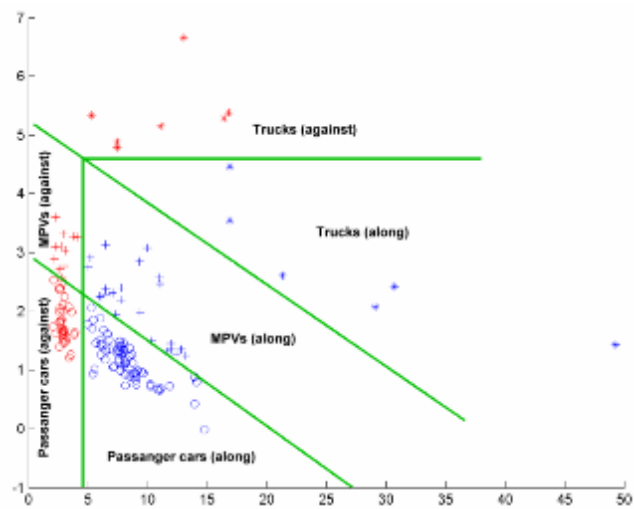
A légi lézerszkenneléssel nyert pontfelhő modellezésében azonban vannak még további lehetőségek. Egy általunk fejlesztett eljárásnál a járművek szegmentálással az előzőekhez hasonlóan elkülönülnek, a feladat azonban az, hogy a közlekedés szempontjából lényeges járműosztályokat (pl. személyautó, kisteherautó, nyergesvontató stb.) határozzuk meg. Kutatásainkban ezért ennek a problémának a megoldására is dolgoztunk ki eljárást.

A járműkategóriák megállapításához az Ohio-adatsort használtuk fel, ahol 72 jármű kategóriáját manuálisan határoztuk meg és szolgáltuk a későbbiekben referenciául. A kategóriák a következők voltak: (1) személyautó, (2) többcélú autók (MPV-k, az USA-ban használt pickup-ok, minivan-ek, SUV-k) és (3) kamion. Mindhárom kategória pontos meghatározása érdekében a tapasztalt rövidülés-megnyúlás jelenség kezelésére mindkét irányban vettünk mintát és azokat is figyelembe véve összesen 6 kategóriánk volt. Az egyes járművek tulajdonságai – amelyek segítségével a kategorizálást hajtjuk végre – az alábbi ábrán látható hosszúság ( $L$ ), szélesség ( $W$ ), valamint a jármű hossz tengelye mentén négy egyenlő hosszúságú térrészbe eső lézerszkennelt pontok átlagos magassága az útburkolat fölött ( $H1-H4$ ).



5.9. ábra: Jármű-jellemzők, amelyek segítségével a kategóriák megállapításra kerülnek

A járművenként megállapított hat jellemzőből álló tulajdonságvektor szerint az osztályozás elvégezhető, azonban a szemléltetés és a könnyebb számítás kedvéért a tulajdonságtér dimenziószámának csökkentése mellett döntöttünk. Ezt a lépést a főkomponens-analízisre épülő Karlhunen-Loeve transzformációval hajtottuk végre. Az eljárás alapján a referenciajárművek tulajdonságvektoraiból egy 6×6-os kovariancia-mátrixot számítottunk, amelynek két legnagyobb sajátértékéhez tartozó sajátvektorral elvégeztük az eredeti tulajdonságvektor transzformációját (Lovas, C K Toth & Barsi, 2004). A lineáris kombinációval kapott komponenseket az 5.10. ábra szemlélteti a járműkategóriákkal együtt. (Földi lézerszkenneléssel Volkswagen Golf és Ford Mondeo típusú járművek pontfelhőj alapján is megállapításra kerültek a tulajdonságvektorok, majd azok transzformációjával kapott komponensek jó egyezést mutatnak a légi felmérésből nyert járművek felismerési eredményeivel (Lovas, 2004)).



5.10. ábra: A Karlhunen-Loeve transzformációt követően megkapott komponensek ábrája a hat eredeti járműkategóriának megfelelően. Az ábrán zöld vonalak jelzik a lehetséges határvonalakat, amelyek egy későbbi szabályalapú osztályozásban felhasználhatók voltak. A grafikon tengelyein a két legjelentősebb sajátérték szerepel dimenzióként.

A főkomponensek szerint átalakított tulajdonságtér felosztására több módszer is kínálkozott. Kutatásainkban ezért a szabályalapú, a minimális távolság és az előrecsatolt (hibavisszaosztós) neurális hálózat döntési mechanizmusokat vizsgáltuk meg. A vizsgálatokat továbbá kiterjesztettük két további légi lézerszkennelt adatállományra is, amelyeket Ontario és Michigan államokban végzett hasonló paraméterezésű repülésekből kaptunk. A következő táblázat a módszerekben szereplő referencia-járművek számát, valamint az elért osztályozási pontosságot mutatja. Az eljárásokban az Ohio-adatsorok felhasználásával határoztuk meg a döntési függvények paramétereit, majd ugyanazon adatokon (*in-sample* teszt) és a további adatokkal bővített adatokon teszteltük.

5.1. táblázat: Járműosztályozási pontosságvizsgálat eredménye légi lézerszkennelésből levezetett transzformált tulajdonságvektorok felhasználásával (Toth, Barsi & Lovas, 2003)

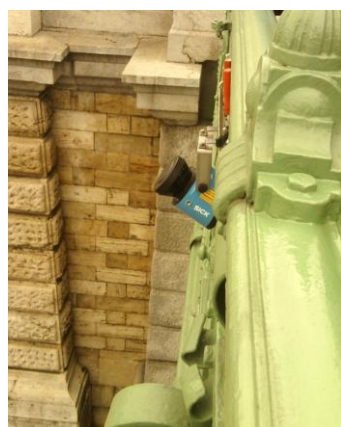
Adathalmaz (járművek száma)	Szabály-alapú	Minimális távolság	Neurális hálózat
Ohio (72)	0 (0 %)	4 (5.6 %)	2 (2.8 %)
Ohio + Michigan (87)	2 (2.3 %)	8 (9.2 %)	8 (9.2 %)
Ohio + Michigan + Ontario (102)	2 (2.3 %)	10 (9.8 %)	14 (13.7 %)

A járműkategóriák megkülönböztetését Lovas Tamás kezdeményezésére járműprofilok alapján is elvégeztük. Az ezekre irányuló vizsgálatokról (Lovas, 2004; Lovas, Barsi & Toth, 2004; Lovas, C K Toth & Barsi, 2004) számol be.

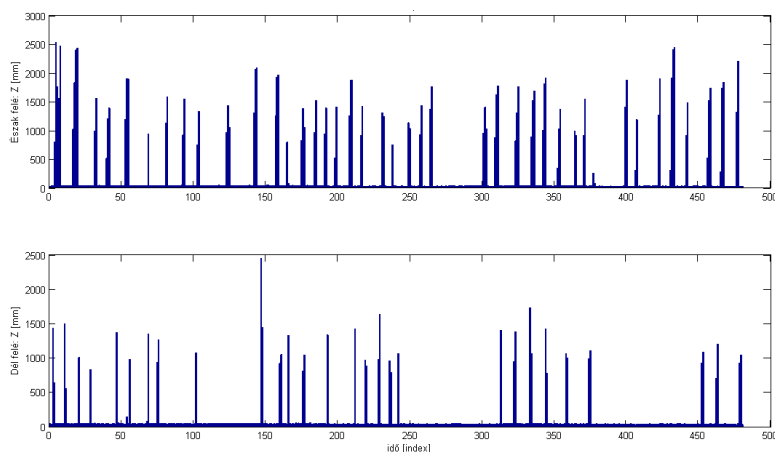
A lézerszkennerek csoportjában a profilszkennerek különleges szerepet töltenek be. Ezek az eszközök egyetlen síkban határoznak meg poláris koordinátákat a hatósugarba eső tárgypontokról. A műszerek fontos jellemzői, hogy egyidejűleg hány profilt képesek kezelni, továbbá profilonként mekkora látószögnél, milyen szögfelbontással és időbeli gyakorisággal (frekvenciával) gyűjtik az adatokat. Kutatásainkban egy alapvetően beltéri használatra készült Sick LMS-100 típusú szkennerral dolgoztunk. Ez a berendezés egyetlen síkban 270°-os látószöggel, 0.5°-os szögfelbontással végez méréseket a gyári specifikáció szerint 50 Hz-es frekvenciával. A rögzített adatok az egyes irányokhoz tartozó távolságértékek mm-ben (egész számként), valamint a visszatérő jel intenzitása 0-255-ös egész számokból álló tartományban. A műszer mérési tartománya 0.5-20 m. Az alkalmazott lézer hullámhossza 905 nm. A műszergyár által megadott távmérési statisztikai hiba  $\pm 12$  mm. (A beltéri változaton kívül a műszernek létezik kültéri és biztonsági változata is.)

A járműfolyam vizsgálatához profilszkennerral méréseket végeztünk a Szabadság-hídról. A szkennert a híd gyalogoskorlátjára erősítettük fel úgy, hogy a függőlegestől mintegy 20 fokos dőléssel, az Alsó rakpart járműveinek haladási irányára merőlegesen helyezkedjék el (5.11. a ábra). A szkennert folyamatosan végzett mérései közül ugyanahhoz az irányhoz tartozó legnagyobb mért távolság a rakpart úrfelületéhez, míg a kisebb távolságértékek egy-egy járműhöz tartoztak.

A folyamatosan mért profilokból a rakparti pontfelhő „története” vezethető le (hasonló készült gyalogosok kapcsán az 5.37. ábrán), amelyből az egyes észlelési időpontokhoz tartozóan megállapítható, hogy járműről vagy az útburkolatról történt-e a visszaverődés. A járművekhez tartozó pontok csoportosításával az összes elhaladt jármű beazonosítható, akár forgalmi irányonként is. Az 5.11. b ábrán látható grafikon az észak és dél felé tartó irányokban felismert járműveket mutatja az idő függvényében. Ennek az ábrának a segítségével további forgalmi jellemzők (pl. átlagos követési idő, időegységre jutó átlagos járműszám stb.) is levezethetők.



a) a profilszkennert felerősítése a Szabadság-híd gyalogoskorlátjára



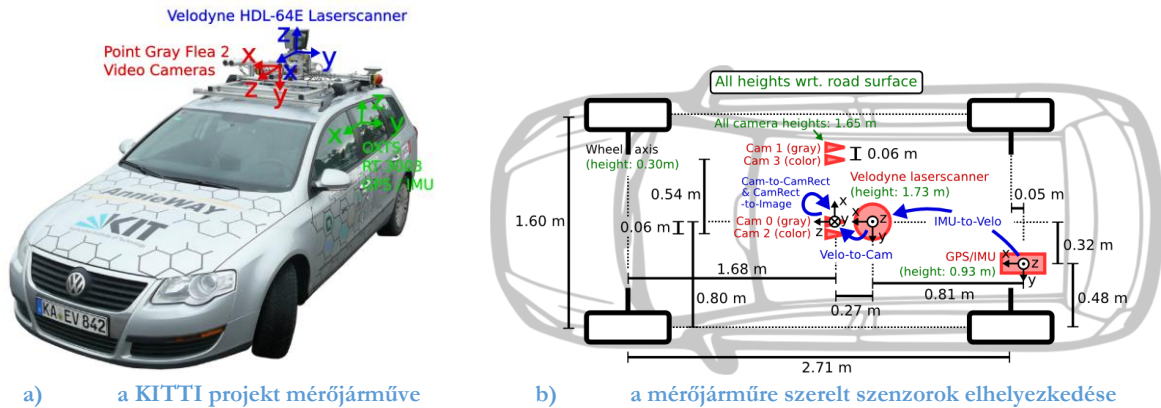
b) a vizsgált időszakban a két forgalmi sávban detektált járművek idő-sora

5.11. ábra: Profilszkennerral végzett forgalomfigyelés a budai Alsó rakparton

### 5.3 Módszertani fejlesztések járműmozgás vizsgálatára

A Karlsruhe-i Műszaki Egyetem (KIT) és a Toyota közös projektjében autonóm járművek fejlesztéséhez egy mérőautót különféle szenzorokkal szereltek fel, amelynek nyers és némi előfeldolgozást követően keletkező adatait bárki számára hozzáférhetővé tették. A KITTI névre keresztelt adatbázisban többféle kutatási

és fejlesztési feladathoz használható csoportokba (pl. sztereo, odometria, objektumok, út, szemantika) szervezték az adatokat. A mérőjárművön a következő eszközöket helyezték el: egy OXTS RT 3003 típusú GNSS/IMU egység, egy Velodyne HDL-64E típusú lézerszkennert, 2 darab szűrkeárnyaltos és 2 darab színes Point Grey Flea 2 kamera. A járművet és a műszerek elhelyezését az 5.12. ábra mutatja.



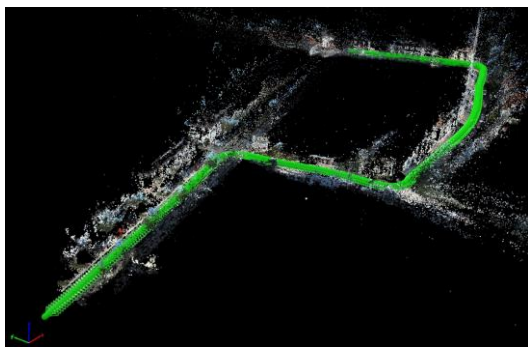
5.12. ábra: A KITTI projektben kialakított mérőjármű a rajta elhelyezett szenzorokkal

Kutatásomban a mérőjármű kameráinak képeit használtam fel. A kamerák 10 fps mérési gyakorisággal,  $1382 \times 512$  pixel méretű, 8 illetve 24 bites radiometriai felbontású képeket rögzítettek. A vizsgálatok során a színes képek segítségével végzett helymeghatározás lehetőségét tanulmányoztam. A vizuálisan megvalósított odometria (*visual odometry*) alapját az jelenti, hogy a jármű mozgása során időben sűrűn készít felvételeket, amelyeknek tartalma a nagy képkészítési aránynak köszönhetően viszonylag csekély mértékben változik. Az ismétlődő képtartalomban érdeklődési operátorral pontok jelölhetők meg, amelyek az egymást követő képkockákon is beazonosíthatók annak ellenére, hogy a kamera helyének elmozdulásával kismértékben más nézetben mutatják az objektumokat. Az érdeklődési operátor a jellegzetes helyeket (intenzitásugrások helye, pontszerűen azonosítható elemek, sarkok stb.) jelölnek ki. Ezeknek a pontoknak a felhasználásával az egymás mellett elhelyezkedő képek relatív helye és helyzete meghatározható, majd szisztematikusan a teljes rögzített képfolyamra is számítható. Amennyiben az SFM-módszert (lásd 4.1 fejezet) alkalmazzuk, kész eljárás-gyűjteményekkel végezhetjük el a feladatot. A teljes film (vagy annak egy összefüggő hosszabb részére) elvégzett számítás a képet készítő kamera helyének sorozatát, végső soron a jármű térbeli helyét, mozgását adja vissza.

Az eljárás igazolására 11 tesztet végeztünk, amelyek különböző helyszínen, különböző környezeti hatások mellett mutatják a módszer tulajdonságait. A számításokat a Pix4D nevű, SFM és MVS technikát ötvöző objektumrekonstrukciós szoftver segítségével végeztem az Amazon felhőszolgáltatásának igénybevételével. A felhőben futó virtuális gép két Intel Xeon E5-2666 v3 mikroprocesszorral rendelkezik, amelynek órajele 2.90 GHz, 36 threads szálát kezel, 60 GB RAM áll rendelkezésre és Linux 3.13.0-91-generic x86\_64 operációs rendszert használ. GPU-ra a számítások elvégzésekor nem volt szükség, illetve a szoftver nem igényelte. Az 5.13. a ábra egy több irányváltást is tartalmazó útszakasz kiértékelését mutatja be. A számításokkal kapott járműpozíciók ellenőrzésére a fedélzeten elhelyezett GNSS/IMU műszer adatai jól használhatók. Ezek alapján mért koordináták és az odometriából számított koordináták legfeljebb néhány méter eltérést mutatnak (Potó & Barsi, 2017a). Az 5.13. ábrán látható teszt például 0.67 m differenciát tartalmaz a műholdas helymeghatározáshoz képest. (Az odometria közvetlenül megadott eredményét még a kezdőpont helyének és a trajektória kezdőirányának megadásával transzformálni kell a WGS84 globális vonatkozási rendszerbe.)

Mivel a kapott vetítési centrum-sorozat térbeli, így annak pontjaiból térgörbe szerkeszthető, amely a városmodellekkel egybevetve jól illusztrálja az eljárás helyességét (5.13. b ábra).





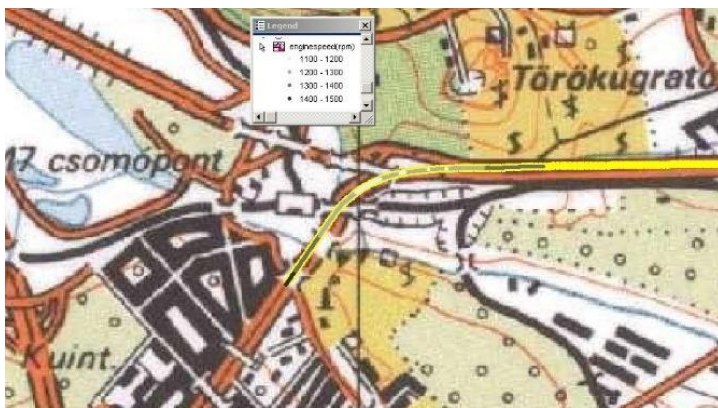
a) összetett út mentén rögzített képkockák folyamatos összekapcsolásából kirajzolódó trajektória



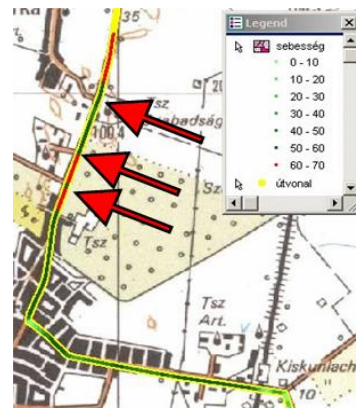
b) térbeli trajektória megjelenítése Google Street-View környezetben

5.13. ábra: Vizuális odometria módszerével számított térbeli járműtrajektória

A járművek mozgását és az azokat vezető emberek viselkedését lehetséges térinformatikai eszközökkel tanulmányozni. A fedélzeti szenzorok vezetés közben gyűjtik az adatokat, amelyekből a vezető reakciója, beavatkozása és így viselkedése jellemezhető. Egy kamion fedélzeti egységével (*onboard unit* – OBU) a jármű motorjáról, váltójáról stb. 10 Hz-es frekvenciával, helyzetéről GPS-vevővel 1 Hz-es frekvenciával időbélyeggel ellátott adatokat gyűjtöttünk. Ennek az adathalmaznak a térinformatikai rendszerben történő elemzése és megjelenítése a gépjárművezető beavatkozásait, irányítását világította meg. Az 5.14. a ábrán látható, amint menet közben a jármű az M7-es autópálya fővárosi bevezető szakaszánál haladva a lejtő és emelkedő útszegmensen lassított, majd felgyorsított. Az 5.14. b ábráról leolvasható, amint külterületen a bekötő utak megközelítésekor a járművezető óvatosságból gázelvétellel reagál (Barsi & Lovas, 2004).



a) motorfordulatszám ábrázolása georeferáltan az M7 és M1 autópálya találkozó szakaszánál. A homorú magassági vonalvezetést fokozatosan gázpedál benyomással követte a járművezető, amire a motor a fordulatszámának megváltoztatásával reagált.



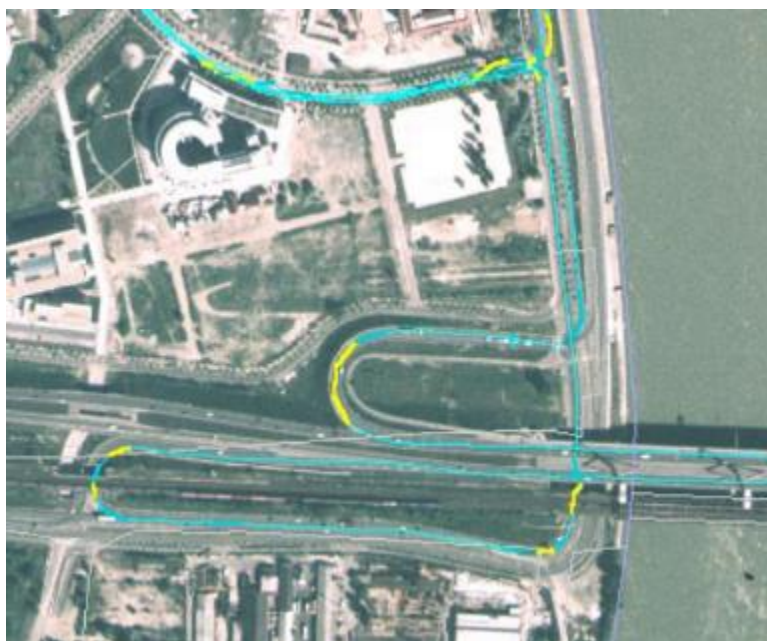
b) külterületi szakaszon a bekötő utak közelében a nyílak által jelölt helyeken megváltozó pedálállások és a jármű sebességének ábrázolása

5.14. ábra: Járművezető-viselkedés elemzésének alapjául szolgáló fedélzeti egység által rögzített különféle mérések megjelenítése térinformatikai környezetben, topográfiai térképi háttérrel

A fentiekhez hasonló viselkedés-vizsgálat már a GPS-pozíciók viszonylag egyszerű feldolgozásából is megvalósítható. A Lágymányosi híd (ma Rákóczi-híd) budai lehajtójánál személygépkocsi tetejére szerelt GPS-vevővel végzett mérés eredménye az egyes pozíciók és azok időpontjai. Az egymás utáni pontok koordinátáiból és időbélyeg-adataiból sebességértékek számíthatók, majd az egymást követő sebességértékek időbeli változásai a gyorsulás mértékét számszerűsítik. Amennyiben folyamatosan három egymás után következő



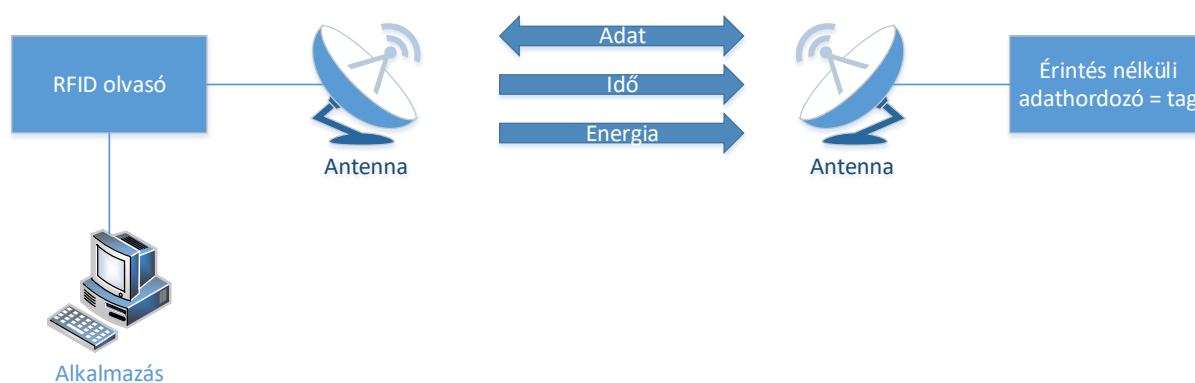
pontra kört illesztünk, majd annak sugarát kiszámítjuk, a gyorsulásvektor pályairányú és oldalgyorsulás komponensekre bontható. A jármű felborulása vagy a rakomány biztonsága szempontjából az oldalgyorsulás értéke lehet kritikus (ami számos balesetben meg is haladja a határértéket és a jármű felborul). Az 5.15. ábra a már említett szakaszon végzett mérésből levezetett oldalgyorsulás térképét mutatja be.



5.15. ábra: A veszélyes-közeli oldalgyorsulás-értékek helyei (sárgával) valós terepi mérés során (Barsi, Lovas & Bakos, 2003)

A járművek mozgásának megfigyelésére és a közlekedés biztonságának növelésére a járművön kívül használt eszközök is alkalmasak. A Safespot nevű EU keretprogramban a lehetséges eszközök és megoldások köréből a rádiófrekvenciás azonosításon (*radio-frequency identification* – RFID) alapuló rendszereket választottuk vizsgálatunk fókuszául.

Az azonosító rendszer felépítését az 5.16. ábra szemlélteti. A két fő komponens az RFID-olvasó (*reader*) és a címke (*tag*).



5.16. ábra: A rádiófrekvenciás azonosító rendszer elvi felépítése (Finkenzeller, 2003) alapján

Az azonosítási folyamatban az olvasó az antennával energiasugárzás révén kérést küld, amit a hatósugarában található címke vesz és választ küld. Ez a válasz lehet csak egy azonosító, de lehet további adat küldése is.

Az olvasó a válaszjelet érzékeli és továbbítja a csatlakozó alkalmazás(szerver) felé. Az RFID-megoldás hatalmas előnye, hogy a tárgyak azonosítása automatikus (egyfajta „digitális vonalkód”), ugyanakkor az olvasó és címke közvetlen összelátását nem kell biztosítani, bizonyos körülmények között azok takartak, elfedettek lehetnek, mégis megtörténhet az olvasás. Az ipar a nagyon olcsó azonosítást várja a rendszertől, ami az üzletek lopásgátló rendszereiben már megvalósult. A nagyobb hatótávolság tartományában erre az árzuhasra még várni kell.

Az RFID rendszereket csoportosítani lehet a kommunikációban használt energiaszint és frekvencia alapján. Alapvetően a címkek nem rendelkeznek tápellátással, azok csak az olvasó által kisugárzott energia felhasználásával működnek. Ha ez a meglehetősen kicsi hatótáv nem elegendő, a címkek bővíthetők saját energiaforrást használó erősítővel. Ekkor a hatótávolság akár néhány száz méterre is növelhető, ami már a közlekedési alkalmazásokban is elegendő.

Az EU 6. keretprogramja által finanszírozott Safespot projektben az RFID közlekedésbiztonsági alkalmazhatóságát vizsgáltuk. Az Identec *Intelligent Long Range* (ILR) rendszere az UHF (*ultra high frequency*), azaz ultramagas frekvenciatartományban működik; Európában a 868 MHz-es frekvenciát használja. A rendszerben irányított (*directed*) és irányfüggetlen (*omnidirectional*) antennák, valamint i-D típusjelű 6 m-es, i-Q és i-QT típusjelű 100 m-es hatótávolsággal rendelkező címkek vannak. Az i-D passzív (tehát áramforrás nélküli) címkek 64 byte, az aktív i-Q címkek 8 kB, a szintén aktív i-QT címkek pedig 32 kB memóriával rendelkeznek. Utóbbiak beépített hőmérőt is tartalmaznak, amelyek beállíthatók, hogy milyen gyakorisággal rögzítsék a környezet hőmérsékletét és a hőmérséklet-naplók akár távolról, a címke lekérdezésekor is letölthetők. A fejlesztéshez és beltéri teszteléshez i-D címkeket, a kültéri „éles” alkalmazásokban az i-Q és i-QT címkeket használtuk (5.17. ábra).



a) a rendszer irányfüggetlen antennája és a címkek, szürke az i-D, fekete az i-Q változat



b) irányított antenna az M1-M7 autópálya szalagkorlátjánál laptop-hoz csatlakoztatva

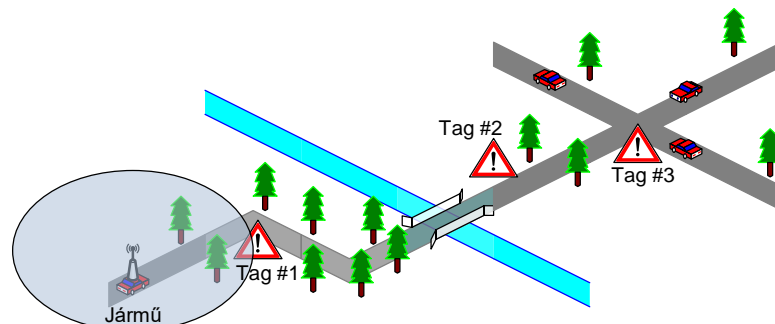
5.17. ábra: Az Identec Intelligent Long Range (ILR) rendszere

Az RFID-rendszerben a címkeket háromféle módon lehet használni:

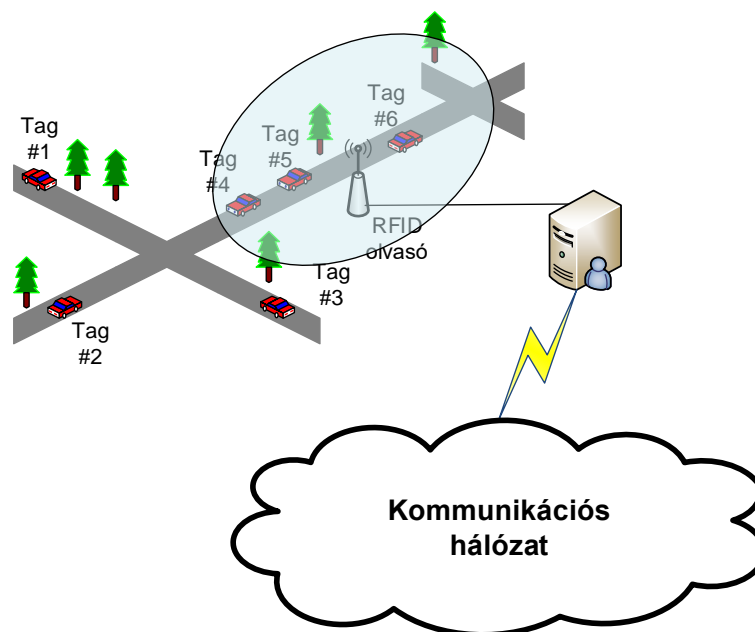
- a címkek szkennelése (*scan*): egyszeri vagy folyamatos jelek küldése, melynek során az elérhető címkek csak az azonosítójukat (pl. 100106031) sugározzák vissza,
- a címkek olvasása (*read*): ekkor a címkek memóriájának vagy annak egy részletének kiolvasása történik; a hőmérsékleti napló kiolvasása külön lehetséges,
- a címkek írása (*write*): az adminisztrációs folyamatban a címkek memóriájába adatok írhatók.

Kutatásunkban alapvetően kétféle konfigurációban vizsgáltuk a rendszer alkalmazását:

1. a címkék rögzítettek és az olvasó antenna mozog,
2. az olvasó antenna rögzített és a címkék mozognak (5.18. ábra).



a) rögzített címkék és mozgó olvasó. A címkék a veszélyes helyekre figyelmeztetnek: #1 éles kanyar, #2 fagyveszélyes útszakasz, #3 baleseti gócpont a kereszteződésben. Az olvasó hatósugara (kék) a jármű mozgásával együtt halad.



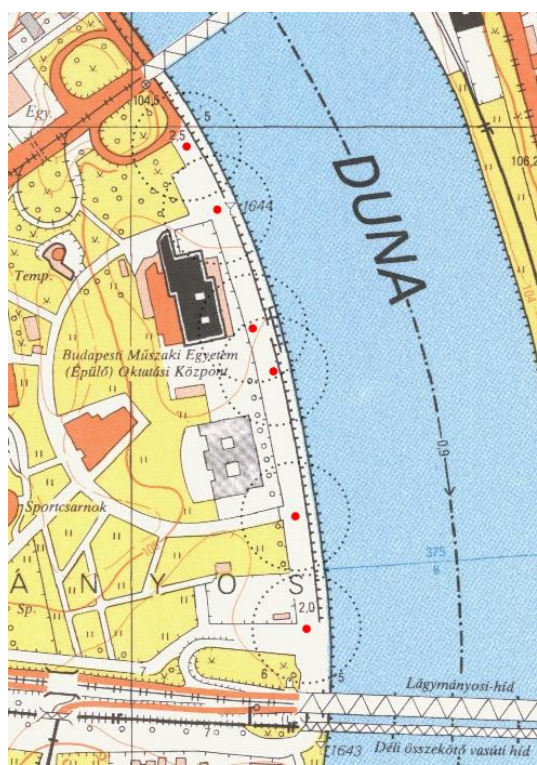
b) rögzített olvasó és mozgó címkék. A címkék az egyes járműveken vannak, a kommunikációs hálózatba kötött olvasó az infrastruktúra része. Az olvasó hatósugara csupán a jelterjedés ingadozása miatt változik. Az alkalmazás például forgalmi adatok gyűjtésére vagy behajtási engedély ellenőrzésére szolgálhat.

5.18. ábra: Az RFID-rendszer kétféle alkalmazási módja a közlekedés támogatására (Safespot Consortium, 2010)

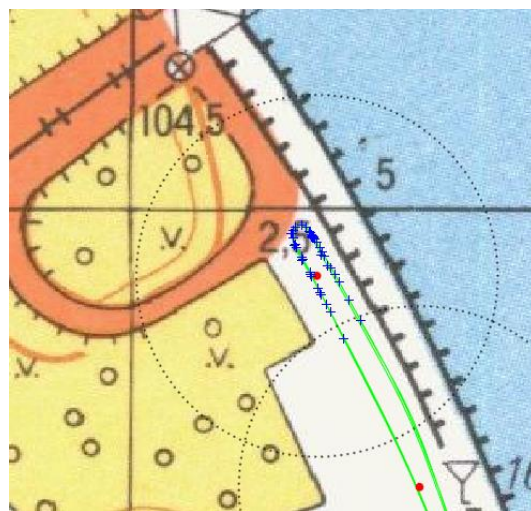
A rögzített címkék segítségével a közlekedés szempontjából fontos helyeket lehet megjelölni. Ilyenek a biztonság szerint veszélyes helyek (pl. baleseti gócek, játszóterek, iskolák vagy vasúti átjárók). A címkék memóriájába a járművezető számára szükséges információkat lehet beírni, amelyet aztán a járműre erősített antennával menet közben olvasnak. A különösen veszélyes helyek előtt akár előjelző megoldást is lehet alkalmazni. Mivel a címkék a kutatás idején még kb. 10 ezer forintba kerültek, de az iparági előrejelzések szerint gyorsan olcsóbbá válnak, megfontolandó, hogy akár nagyobb számban is ki lehet helyezni azokat, például akár minden közlekedési táblára.

A rádiófrekvenciás azonosítási technológia rendkívül előnyös tulajdonsága az, hogy gyakorlatilag megvilágítástól és meglehetősen nagy biztonsággal az időjárási körülményektől függetlenül is képes működni. Ez annyit tesz, hogy napszaktól és évszaktól független állandó (ahogy azt újabban szokás jellemezni 24/7) rendelkezésre állású megoldásról van szó (pl. éjszakai sűrű hóesésben is működik).

A mozgó antennával végzett címkeolvasások minőségi mérőszámait több terepi vizsgálatban tanulmányoztuk. Így teszteltük, hogy milyen távolságból lehet a címkéket megbízhatóan olvasni, milyen helyre (síkra, zsilag és magasságilag) kell azokat elhelyezni, mekkora sebességgel történhet az olvasás (5.19. ábra). A tesztek során a mozgó antenna helyét GPS-szel határoztuk meg, majd a két adatfolyam szinkronizálása az időbélyegek alapján történt. A kísérletek szerint a 100 m-es hatótávolság elegendő a közlekedés biztonságának növelésére (Krausz & Barsi, 2007; Safespot Consortium, 2010).



a) a budai Pázmány Péter sétányon elhelyezett i-Q típusú címkék hatósugarukkal. A háttér 1:10.000-es méretarányú topográfiai térkép.



b) egy címke olvasása során végzett mérések helyei a címke környezetében. A zöld vonal a jármű trajektóriája, a kék kereszt az észlelések helyei, a piros pontok a címkék helyei.

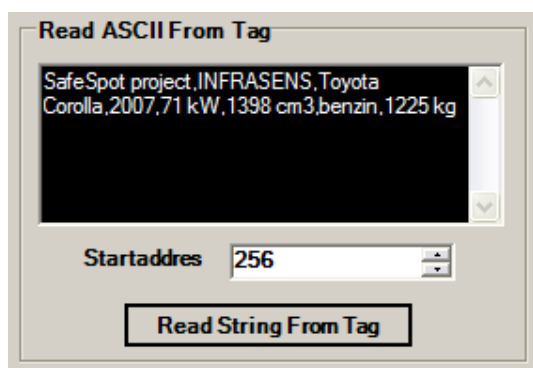
5.19. ábra: Rögzített címkékkel végzett járműves mérések

A mozgó címkés RFID-megoldás esetén az utak mellett rögzítetten helyezük el az antennát, a címkéket pedig a járművekre kell erősíteni. Ebben az esetben a címkékből kiolvasható információk kétfélek: csak a címke azonosítója vagy a címke memóriájába írt információk. Utóbbinál felmerül, hogy a címke hordozhatja a jármű forgalmi engedélyében feltüntetett adatokat is, akár többlet-információval együtt, így a címke olvasása a következő esetekre használható:

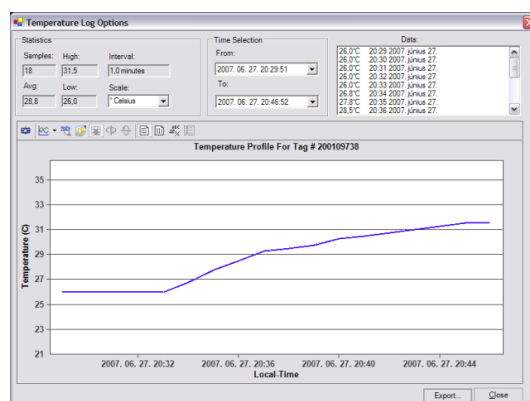


- „igazoltatás”: a jármű megállítása nélkül lehet olvasni a forgalmi engedély adatait (a megoldás egy-fajta „e-rendszám”),
- belépési jogosultság ellenőrzése: behajtás-korlátozott zónákban vagy környezetvédelmi korlátozó-soknál (pl. a londoni *Ultra Low Emission Zone* mintájára kialakított városrészekbe történő belépéskor lehet használni),
- infrastruktúra-használat ellenőrzése: parkolóokban vagy parkolóházakban, mélygarázsokban, fizető-s utakon az útdíjfizetés alapja (pl. amerikai E-ZPass rendszer),
- forgalomszámlálás.

A címkék szkennelése csak az azonosítókat adja vissza válaszul, ez minimális adatmennyiséget jelent. Vizsgálataink szerint így a járműazonosítás még a megengedett autópálya sebességhatár betartásakor (130 km/h sebességnél) is hibátlanul működik. Alacsonyabb sebességnél (a vizsgálatainkban közel 100 km/h-nál) még a forgalmi engedély adatmennyisége is olvasható (5.20. ábra). Természetesen több elrendezést is teszteltünk: a jármű rendszámánál, a motorháztető alatt, a kalaptartóban, a műszerfalon stb. elhelyezett címkékkel (Safespot Consortium, 2010).



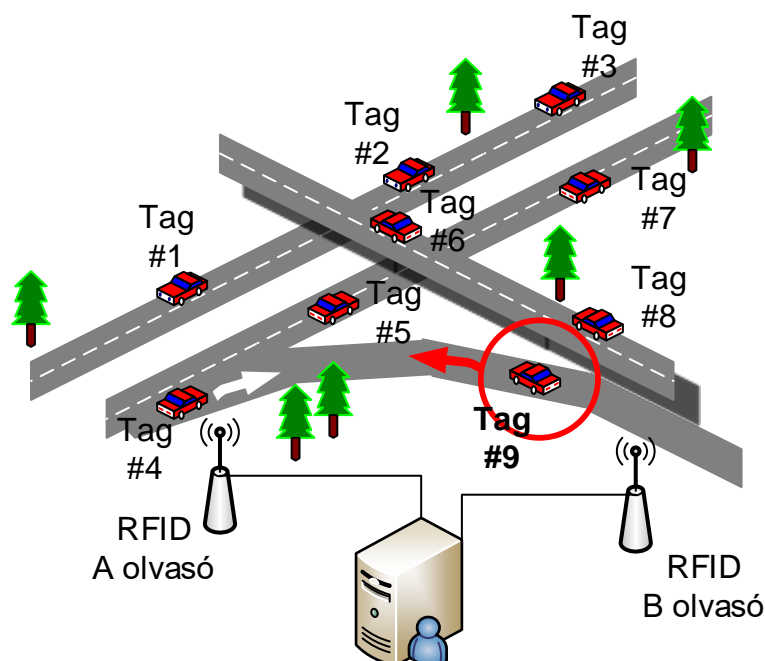
a) forgalmi engedély-jellegű adatok olvasása a címke memóriájából menet közben. A képen a felhasználói felület részlete látható.



b) hőmérsékleti adatok olvasása mozgó jármű címkéjének memóriájából. A mintaalkalmazás az adatok gyors ábrázolására is képes.

5.20. ábra: Járműre rögzített, mozgásban lévő címkék olvasása

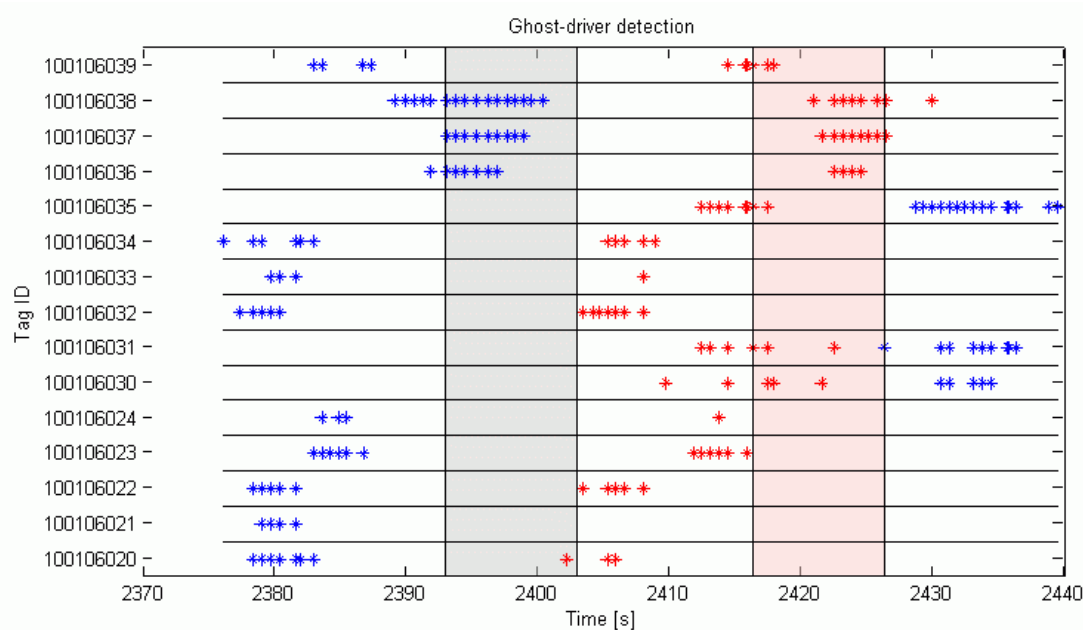
A közlekedésbiztonság témájában a legfontosabb RFID-alkalmazásunk a forgalommal szembehajtó járművek azonosítása. A forgalommal szembehajtó jármű figyelmetlenségéből, a rossz látási viszonyok miatt, fogadásból vagy vagányságból, esetleg öngyilkossági kísérletből tipikusan autópályán vagy osztottpályás úton, azok fel- és lehajtó útszakaszain a kijelölt forgalmi iránnyal ellentétes irányban halad (5.21. ábra). A járművek összeadódó sebességei miatt a reakcióidőn belüli távolságváltozás gyorsabb, a bekövetkező balesetek súlyossága pedig fokozott, gyakran halálos kimenetelű.



5.21. ábra: A forgalommal szembehajtó jármű (#9 számú címkével) érzékelése A és B olvasókkal

A rádiófrekvenciás azonosításon alapuló rendszer automatikus észlelési és figyelmeztető alkalmazás részévé fejleszthető. Láthatóan a járművek címkével ellátottak, így azok ellenőrzésére az infrastruktúra részeként olvasórendszert kell kialakítani. Belátható, hogy az A jelzésű olvasó után a B jelzésű olvasónál észlelt ugyanazon címke a helyes, míg a fordított áthaladási sorrend a szembehajtást jelenti – természetesen megfelelő időablakon belül.

Az 5.22. ábrán egy kísérlet mérései láthatók az egyes észleléseket idő és címkeazonosító szerint rendezve. A szembehajtás kimutatásához beállított időablakot a szürke sáv szemlélteti.

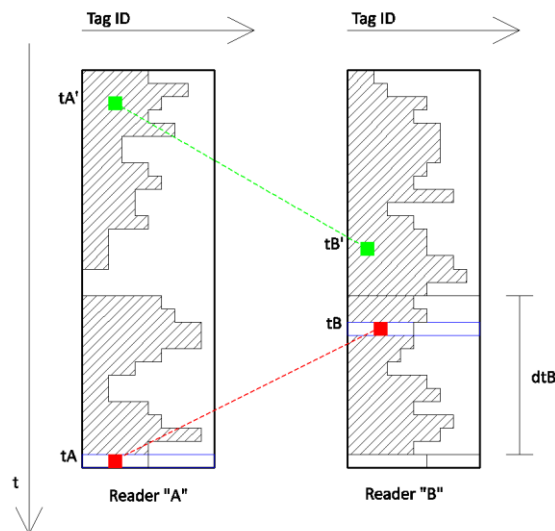


5.22. ábra: Forgalommal szembehajtó jármű észlelésére végzett mérés adatai idő- és címkeazonosító szerint csoportosítva. A kék és piros jelek az A és B jelű olvasóhoz tartozó észleléseket, a szürke és halványpiros sávok a beállított időablakot mutatják.



Az egyes azonosítókhoz tartozó észlelések egy-egy sorban szerepelnek. A kék színnel jelzett A jelű olvasónál történő áthaladás után a járművek kicsivel később megjelentek a piros színnel jelölt B olvasónál is. Kritikus esemény akkor jelentkezik, ha az érzékelés először a B olvasónál történik, majd ugyanannak a címkének megjelenik az A olvasónál is az időablakon belül. Ezt mutatja az ábra halványpiros sávja. Hangsúlyozni kell, hogy a szabálytalanul haladó jármű észlelésére legalább két olvasó megfigyeléseire van szükség; egyetlen olvasó észlelése csak áthaladást (jelenlétet) képes megmutatni.

A fejlesztés során elsőként beltéri szimulációt végeztünk kisebb hatótávolságú címkékkel, majd a tapasztalatokból így megfogalmazható volt a forgalommal szembehajtó jármű kimutatásának algoritmus. A gyakorlati megvalósítás során látható módot az 5.23. ábra mutatja (Barsi, Lovas & Krausz, 2009).



5.23. ábra: A forgalommal szembehajtó jármű kimutatása a gyakorlatban implementált algoritmussal A és B olvasók között

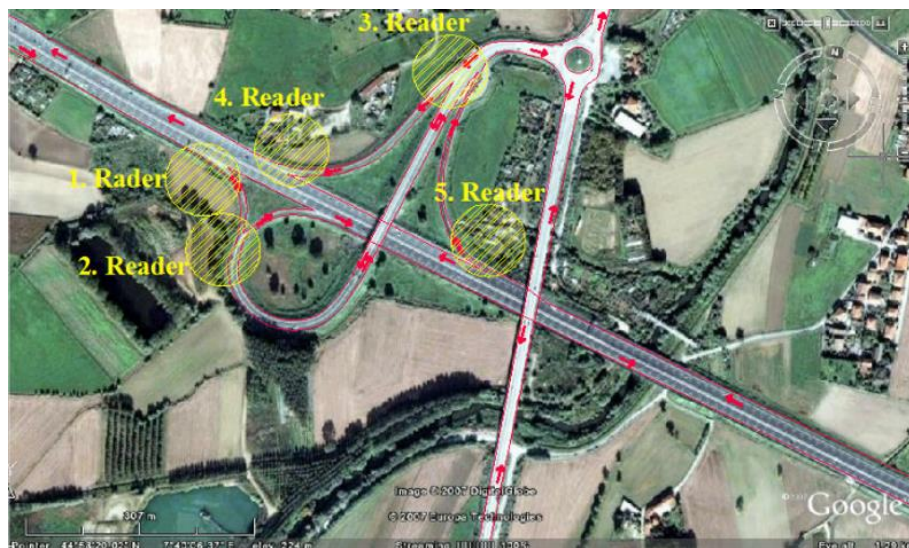
A diagramon az A és B olvasók észlelései láthatók. Az egyes téglalapok vízszintesen az egy-egy szkennelés során észlelt címkék azonosítóit mutatják nagyság szerint növekvő sorrendben, míg a függőleges tengelyen lefelé növekvően az észlelés ideje szerepel. A besatírozott részek illusztrálják a változó számú címke leolvasását. A forgalommal szembehajtó jármű felismeréséhez kulcsfontosságú, hogy az olvasók adatai valós időben elérhetők legyenek; itt az A olvasó mérései a B jelű számára.

Az A olvasó  $tA'$  időpontban észlelt címkéje kicsivel később  $tB'$  időpontban jelentkezik B olvasónál. Ez a szabályos haladási irány, így nem kell tenni semmit. Azonban az olvasók adatcseréje folyamán A olvasónál észlelt címkék mindegyikét  $dtB$  időablakon belül ellenőrizni kell B olvasónál is: az A olvasónál  $tA$  időponthoz tartozó címke azonosítója szerepel a B olvasó átadott adatai között  $tB$  időpontban. Mivel  $tA - tB < dtB$ , azaz a két címkeolvasás ideje a kritikus időablakon belül van, megállapíthatjuk, hogy a jármű előbb B olvasónál, majd A olvasónál volt észlelhető. Ez a riasztási esemény (az ábrán piros vonal szimbolizálja). (Barsi, Lovas & Krausz, 2009; Krausz, Lovas & Barsi, 2017).

A Safespot-projektben ennek a módszernek az alkalmazását a Fiat Kutatási Központjának Torino-Orbasano-i próbapályáján valódi járművekkel is teszteltük. Számítógépes hálózatba kötött két laptop végezte az észleléseket az antennákkal, majd az A (szerver)olvasó fogadta B (kliens)olvasó észleléseit és folyamatosan ellenőrizte az időablakon belüli címkék azonosítóit. Mivel egy jármű hosszabb ideig tartózkodik egy olvasó hatósugarában, ezért a riasztás szerencsére nem egyetlen időpont észlelésére korlátozódik. A riasztás a Safespot rendszerben kidolgozott szabványesemény volt, amely továbbításra került a járművek ad-hoc hálózata (*vehicle ad-hoc network* – VANET) felé is (Safespot Consortium, 2010).

A forgalommal szembehajtó jármű automatikus kimutatására szolgáló algoritmus birtokában konkrét helyszínekre lehet infrastruktúrát tervezni. A tervezésnél adottságként jelentkezik a forgalom lebonyolítására kialakított csomópont, amihez meg kell találni azokat a helyeket, ahonnan a járműfolyam folyamatos megfigyelésén keresztül az azonosítók észlelésével kimutathatók az esetlegesen szembehajtó járművek. A kutatást először manuális módszerekkel, majd az automatizálás igényével végeztük.

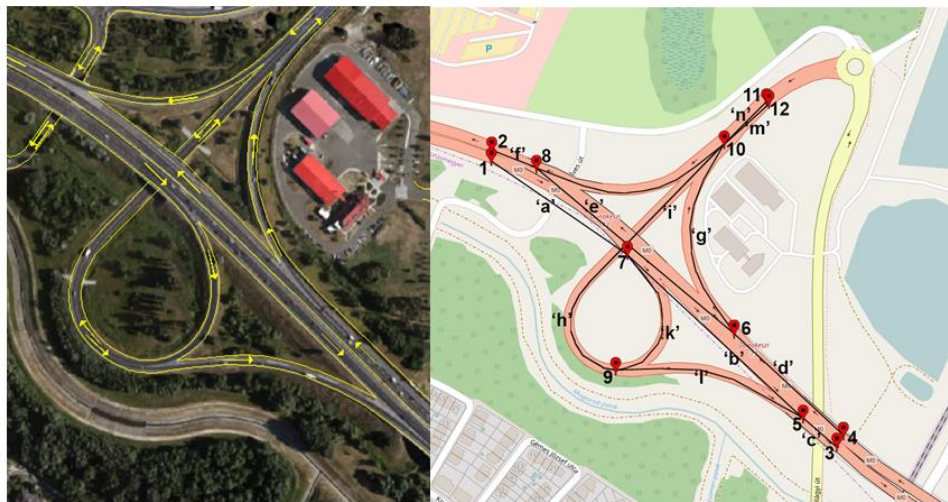
A manuálisan végzett antenna-elhelyezés elsődleges szempontja, hogy a kritikus útszakaszra két megfigyelő antenna legyen elhelyezhető úgy, hogy a címkékkel felszerelt járművek áthaladási sorrendjéből kimutatható legyen a szembehajtás. Az 5.24. ábrán a Torino-t délen elkerülő autópálya Tagliaferro-i kereszteződésének esetére lehet látni egy manuálisan kialakított észlelőrendszert. A megoldás az 1-2 olvasókkal, a 3-4 olvasókkal, valamint a 3-5 olvasókkal jelzett szakaszok automatikus monitorozását végzi. Nyilvánvaló, hogy a kereszteződés teljes, tehát minden forgalmi sávjára kiterjedő megfigyelőhálózat kialakítása az úthálózat topológiájától függ és általában meglehetősen nehézkes.



5.24. ábra: Manuális módszerrel tervezett RFID-megfigyelőhálózat a Torino-i déli elkerülő autópálya egyik kereszteződésében (A55-SR20). A sárga satírozott körök az irányfüggetlen antennák hatósugarait jelentik, a piros nyilak a szabályos haladási irányokat jelzik (Safespot Consortium, 2010).

Ennek a nehézségnek a megoldására kezdtük el a kutatást az automatizálás irányába. Az eljárást a budapesti M0 körgyűrű Dunakeszi-Káposztásmegyeri lehajtójának példáján illusztrálom.

A kidolgozott módszertan bemenő adatként a vizsgált kereszteződés úthálózatában kialakított út-gráfból indul ki (5.25. ábra).



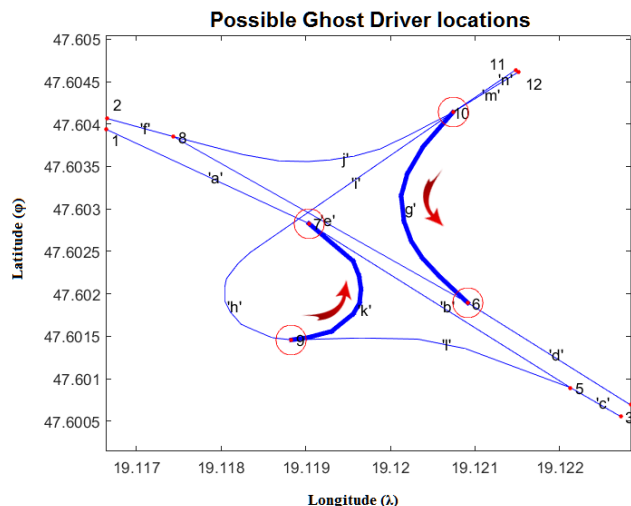
5.25. ábra: Az M0-körgyűrű Dunakeszi-Káposztásmegyeri lehajtójának úthálózati gráfja a haladási irányokkal (bal ábrarész) és a topológiaiilag szükséges csomópontokkal és élekkel (jobb ábrarész)

A hálózat éleire automatikus eljárással is felépíthető a gráfcsomópontok (node-ok) összekötöttségét leíró ritka (*sparse*) adjacencia-mátrix ( $\mathbf{A}$ ).

Az eljárás során azt kell vizsgálni, hogy vannak-e a hálózatnak olyan útszakaszai, amelyek oda-vissza irányhoz tartozhatnak, azaz  $\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{A}_{ji}$ , feltéve, hogy  $\mathbf{A}_{ij} \neq 0$ .

Ezek a közös útszakaszok ugyanis a geometriai sajátosságokból adódóan lehetővé tehetik a tévedést, vagyis a jármű a haladásakor esetleg rossz élen fog továbbmenni. Ez a felismerés jelenti a kritikus élek kimutatásának lehetséges műveletét: meg kell keresni az adjacencia-mátrixban azokat az elemeket, amelyek szomszédságban (folytatódási vagy illeszkedési) viszonyban vannak a kérdéses elemekkel; ezek az  $\mathbf{A}_{*i}$  és  $\mathbf{A}_{j*}$  elemek.

A művelethez az összes lehetséges útkombináció vizsgálata szükséges, mivel a csak közvetlen kapcsolatokat tartalmazó ritka adjacencia-mátrix nem fogja a teljeskörű vizsgálatot biztosítani. Az összes kapcsolat megállapításához általánosan elterjedt eszközök állnak rendelkezésre: ilyen például a Floyd-Warshall eljárás. A létrejött általánosított adjacencia-mátrix mellett végzett kiegészítő művelet az összes csomóponttól az összes csomópontra vezethető élek láncolatát is eredményezi. Ebben a listában (a megvalósítást jelentő Matlab környezetben: cellamátrixban) kell a közös élekre illeszkedő szomszédokat beazonosítani. A Dunakeszi-Káposztásmegyeri lehajtó esetében a potenciális szembehajtásra alkalmas élek a következő ábrán láthatók (Nikol Krausz & Barsi, 2017).



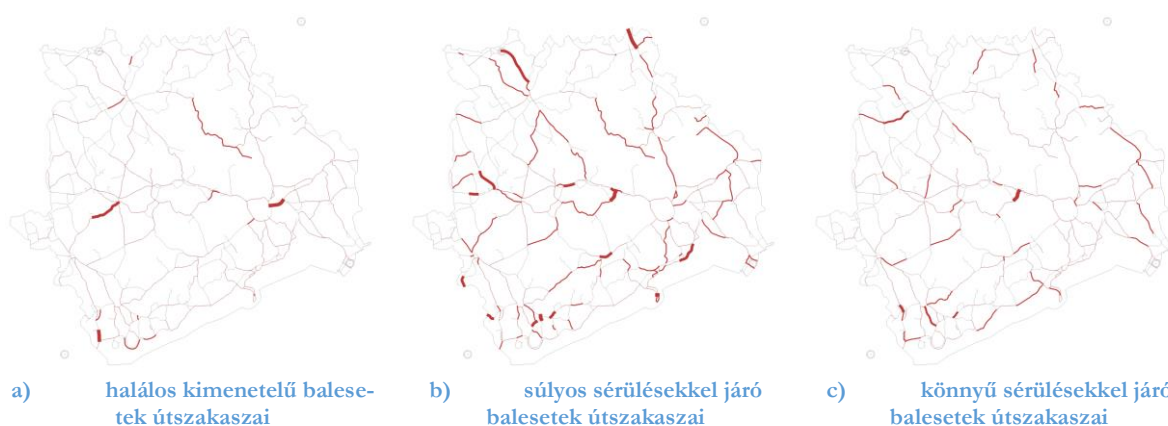
5.26. ábra: A potenciálisan forgalommal szembehajtásra alkalmas útszakasz az 5.25. ábra gráfjának vizsgálatával

(Nikol Krausz & Barsi, 2017) cikke különböző bonyolultságú útkeresztveződésre elvégzett elemzések eredményeit mutatja be.

A bekövetkezett közlekedési balesetek körülményeinek vizsgálata a jövőbeli biztonság szempontjából számít fontosnak. A baleseti helyszínek térbeli és időbeli eloszlása utalhat arra, hogy bizonyos időszakokban egy-egy útszakasz használata a balesetek száma és súlyossága szerint kockázatos. Ilyen körülményt jelentenek a már vizsgált fagyveszélyes helyek, de hasonlókat tapasztalhatunk például intenzív hóátfúvás vagy levélhullás helyein. A balesetek helyei statisztikailag erősen korrelálnak a beláthatósággal is; ezek ugyan a tervezéskor kimutathatók és a helytelen vonalvezetés elkerülhető, azonban a régi utak, korábbi átépítések, esetleg a burkolat állapotának leromlása okozhat megnövekedett baleseti számokat pontosan behatárolható helyeken.

Az összegyűjtött baleseti adathalmaz térinformatikai elemzése az így vizsgálandó helyekre hívja fel a figyelmet. Példaképpen Veszprém megye úthálózatán egy teljes naptári évben (1998-ban) bekövetkezett balesetek adatait tanulmányoztuk. Az akkori közútkezelő (a Veszprém Megyei Állami Közútkezelő Közhasznú Társaság) nyilvántartásában 440 személyi sérüléssel járó baleset történt. A megyei úthálózat számomra elérhető adatrésztességében 1876.107 km hosszúságú volt 577 útszegmensben. A bekövetkezett balesetekben 42-en életüket veszítették, 236-an súlyosan és 431-en könnyen sérültek meg.

A következő ábra a bekövetkezett balesetek térbeli eloszlását mutatja a megye útjain.



5.27. ábra: Veszprém megye közútjain 1998-ban bekövetkezett balesetek előfordulási gyakoriságainak térképe a baleset súlyossága szerint csoportosítva. A vonalvastagság a gyakorisággal arányosan növekszik. ((Marosi, 1999) adatai alapján saját szerkesztés)



## 5.4 Gyalogosok mérése

Az értekezésben korábban már bemutatott akciókamera alkalmas arra is, hogy közlekedő gyalogosok érzékelését végezzük el velük. Kísérletünkben a BME kampuszán erősítettünk fel egy SJCAM SJ4000 típusú akciókamerát egy negyedik emeleti iroda ablakába, ahonnan tiszta rálátás adódott a gyalogútra. Reggel, az oktatás kezdése előtt, mintegy 15 perces videót rögzítettünk. A video 30 fps mellett full HD (1920×1080 pixel) felbontásban készült és közel 1 GB memóriát foglalt el. Az 5.28. ábra bal oldalán látható a videó egy képkockája. A nagyobb tárgytávolság miatt az akciókamerák hordótorzítása fokozottabban jelentkezik, ezért sakktabla-minta segítségével kamerakalibrációt végeztünk és meghatároztuk az elrajzolási paramétereket. Ezeknél az eszközöknél is lehetséges volt a pixelméret alatti (jelen esetben 0.6909 pixel mértékű) visszavetítési hiba elérése, így a képeket torzításmentessé alakítottuk (5.28. ábra jobb oldala).



5.28. ábra: Gyalogos megfigyelő akciókamera videójának eredeti torzított és kamerakalibrációt követően torzításmentessé tett képkockája

A járható gyalogosfelület lemaszkolásával a feldolgozandó képterület nagyságát hatékonyan lecsökkentettük, majd a szintén már ismertetett Gaussian Mixture Model (GMM) alkalmazásával a mozgó gyalogosokra, mint előtér-pixelexre szegmentálást végeztünk. Az összetartozó (azaz egy gyalogoshoz) tartozó előtérpixelexeket egy csoportba vontuk, majd a súlypontjuk meghatározásával az adott objektum trajektóriájának adott képkockához tartozó időpontjához rögzítettük. Amennyi függetlenül felismert önálló pixelcsoport jelentkezett a képen, annyi objektumnak megfelelő külön memóriát használtunk, s ezekben rögzítettük a megállapított trajektória pontjait. A felismerési zajok csökkentése érdekében a trajektória pontjai alapján egyszerű (síkráji pozíciót és pozícióváltozást tartalmazó állapotvektorral) Kálmán-szűrőt paramétereztünk, majd simítottuk a trajektóriákat. Ezt követően a pixelkoordinátarendszerben megkapott trajektóriákat felülnézeti ortofotók koordinátáinak felhasználásával transzformáltuk, így felülnézeti rendszerre tértünk át. Ebben a rendszerben kaptuk meg a trajektóriák végleges helyeit, majd vezettük le a forgalmi jellemzőket (átlagos sebesség, gyalogos-sűrűség stb.). Az 5.29. ábra a trajektóriák mellett a gyalogos sűrűségterképét (hőterképét) szemlélteti (Arpad Barsi *et al.*, 2016).



a) felülnézeti képen a levezetett gyalogos-trajektóriák. Minden érzékelt gyalogos külön színnel került megjelenítésre.

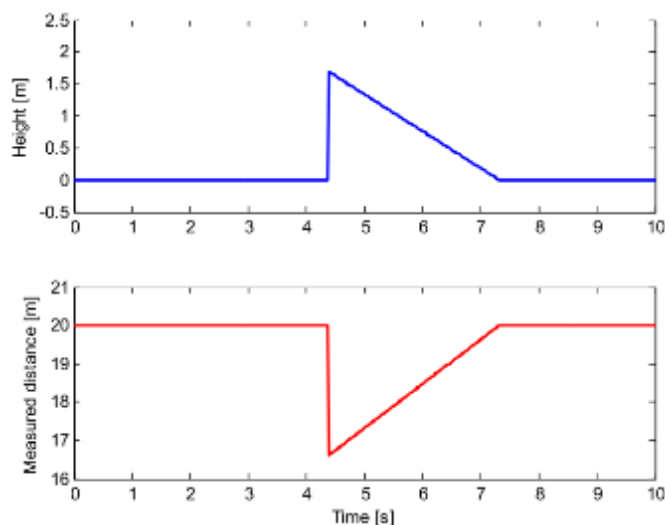


b) a használt gyalogút forgalmi sűrűség térképe. Látható, hogy a gyalogosok előszeretettel rövidítik le az épületek közötti útjukat, közben kikerülve az akadályokat

5.29. ábra: Akciókamerával rögzített gyalogosvideó automatikus kiértékelésével nyert forgalmi adatok: trajektóriák és forgalomsűrűség-térkép

A járműforgalom tanulmányozására már bemutatott profilszkennerek (lásd 5.2. fejezet) egy lehetséges alkalmazási területe a gyalogosok megfigyelése.

Az előzetesen végzett szimulációk megmutatták, hogy a függőleges elrendezéstől eltérő mérésekkel lehetőség kínálkozik arra, hogy a műszerhez tartó vagy attól távolodó gyalogosok testének folyamatosan más magasságú részét éri a lézernyaláb (5.30. ábra). Távolodó vagy közeledő mozgás esetén a gyalogos kb. 4.5 másodpercig a műszer profilja alatt tartózkodik, előtte a talaj távolsága a legnagyobb mérhető távolság. Majd amikor eléri a szkennelés síkját, először a legmagasabb pontjáról (a fejtetőről) érkezik vissza jel. Folyamatosan tovább haladva egyre lejjebb találja el a lézert a testét (váll-derék-térd-boka), míg végül újra a talajról verődik vissza a jel. Ellentétes irányba haladó gyalogos éppen fordítva okozza a távolság megváltozását, így a haladási irány könnyen megállapítható.



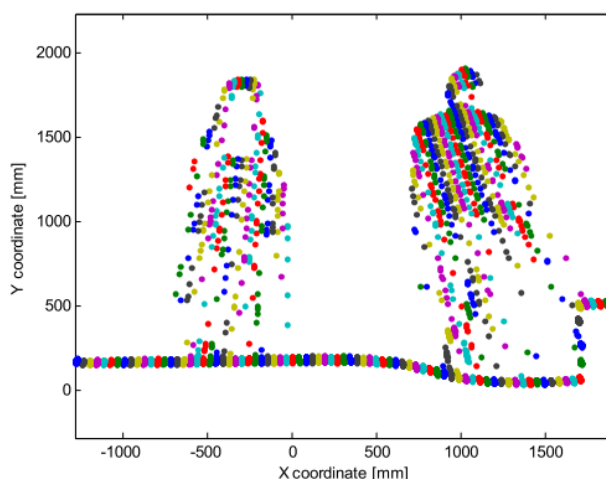
5.30. ábra: A profilszkennelés szimulációja a műszertől távolodó gyalogos esetén. Az alsó ábra a szimulációval kapott távolságméréseket, a felső pedig a tényleges gyalogosmagasságot mutatja (Lovas & Barsi, 2015).



A BME központi épületében végzett méréseken a műszert egy lépcsőház korlátjára erősítettük fel a nadírhoz képest körülbelül  $20^\circ$ -os dőlésszöggel. Ismert magasságú tárgy segítségével a dőlés meghatározható, s a későbbi feldolgozáshoz kalibrációs adatként felhasználható a függőlegesre való átszámításban.



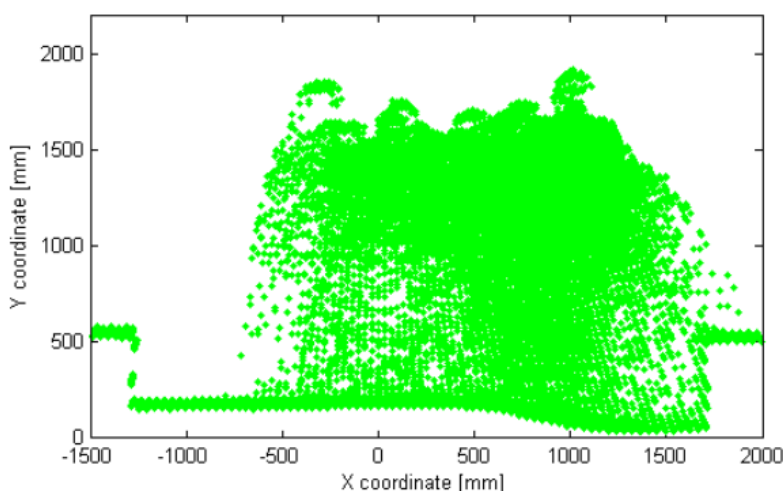
a) a profilszkennelés elhelyezkedése a lépcsőházi korláton (a rajzolt nyílások dőlése nagyobb, mint a valóságos).



b) az adatállományban megjelenő gyalogosok képe. Az ábra mindkét irányba haladó gyalogosokat rögzítő összes profilpontot tartalmazza.

5.31. ábra: A profilszkennelés végrehajtása beltérben (Lovas & Barsi, 2015)

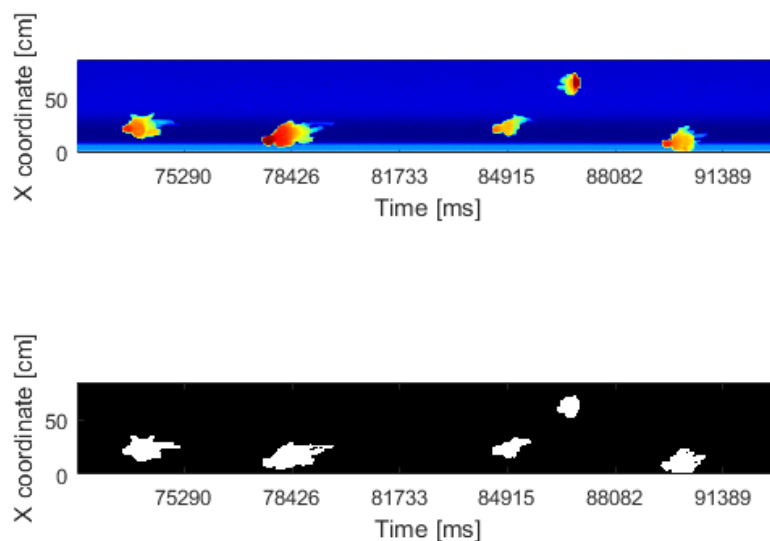
A profilmérések egyik eredménye, amikor a megfigyelt időintervallum összes pontját egyetlen ábrába sűrítjük. Ezzel a megoldással a folyosói űrszelvény kihasználtságát lehet láttatni (5.32. ábra). Megfigyelhető, hogy a gyalogosok itt is rövidítenek, azaz a szelvény jobb szélé felé orientálódnak, amerre a csatlakozó lépcsőszakasz található. A vizsgált szelvényre természetesen lehet gyakorisági ábrát (hőtérképet) készíteni; gyors szemrevételezéssel itt a vízszintes 500 és 1000 mm közötti tartományban tapasztalható a legnagyobb áthaladási gyakoriság.



5.32. ábra: Gyalogos sűrűségi kép egyetlen profil összes mérésének aggregációjával

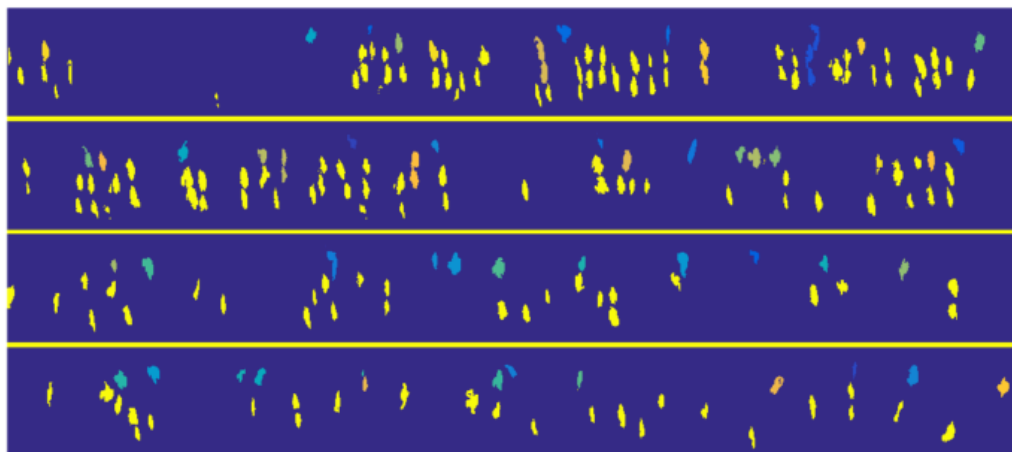
A mérések részletes vizsgálatához egy köztes termék előállítása célszerű. Ez a köztes eredmény a gyalogosát-haladások történetét mutató ábra, amely egy digitális kép, tehát raszteres adatformátumban tartalmazza a mérési eredményeket. A történeti kép vízszintes tengelyén a megfigyelések időpontjai szerepelnek, míg a

függőleges tengely mentén a tanulmányozott szelvény  $x$ -koordinátái vannak feltüntetve. Az egyes raszter-cellák tartalmazzák az időpontban adott  $x$ -koordináta mellett észlelt  $y$ -koordinátákat, utóbbiak a gyalogosok magasságait reprezentálják (5.33. ábra).



5.33. ábra: A gyalogosok áthaladásának raszteres történeti képe. A felső grafikon a mért magasságok szerint színezett, az alsó egy küszöb fölötti binarizált értékeket ábrázolja; a háttértől elkülönülő foltok a gyalogosok.

Az eljárással 10 percnyi mérés alatt 18792 profil került rögzítésre, amin 46 gyalogos látható. A percenkénti átlagos gyalogosszám 5, a legkevesebb 3, a legtöbb 7 volt. Egy későbbi alkalommal a BME nagyelőadó (Auditorium maximum) előadásának végére időzítettük a mérést. Ekkor a rögzített raszteres történeti kép a következők szerint nézett ki (5.34. ábra). A jobb áttekinthetőség kedvéért 4 részre daraboltam a képet, továbbá az egyes gyalogosok, mint önálló pixelcsoport saját színezést kaptak (*connected components labelling* eljárással).



5.34. ábra: Előadás utáni folyosói gyalogosfolyam minden gyalogos önálló színezésével

A 406 s időtartamig tartó mérés alatt 12918 rekord (profil) rögzítése történt meg, amelyek tárolásához mintegy 155 MB-ra volt szükség (A. Barsi *et al.*, 2016). A fentiekből kiolvasható az is, hogy a műszer közel 31.8 Hz-es mérési frekvencián dolgozott, ami elmaradt a megadott gyári frekvenciától. Feltehetően a lappal végzett adatrögzítés frekvenciája a számítógép háttértárolójának és az operációs rendszer sebességének volt függvénye.

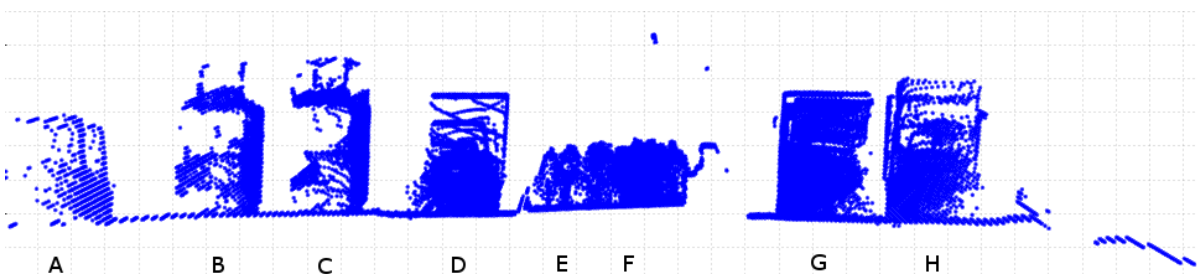
A feldolgozás eredményeként megkaptuk, hogy 232 diák hagyta el az előadótermet; köztük néhányan gyorsabban, mint a többiek; ezek a foltok vízszintes értelemben keskenyek, míg a lassan közlekedők hosszan elnyúló nyomokat hagytak a raszterképen. Jól megfigyelhető az az általános vonás, hogy a távozó hallgatók többnyire egymás mellett haladnak.

A profilszkennerral olyan kültéri helyen is végeztünk méréseket, ahol a járdán nemcsak a gyalogosoknak, hanem a kerékpárosoknak is van felfestve sáv. A közös használatú útfelületnél a biztonságos oldalirányú távolság megtartásának vizsgálata volt a célunk az Erzsébet-híd alatt, a felső rakparton.

A műszert a híd gyalogoskorlátjára erősítettük fel, majd többször rögzítettünk közel 5 percnyi mérést. Az egy méréshez tartozó összes pont megjelenítése kiválóan illusztrálja a forgalmi sávokat (5.35. ábra). A könnyebb érthetőséget fénykép segíti.



a) az Erzsébet-híd alatti forgalmi sávok képe Google StreetView-ban



b) profilszkennerral mért űrszelvény az egyes sávok közlekedőivel. A – a Szent Gellért tér felé haladó autók, B – a Szent Gellért tér felé haladó villamos, C – a Batthyány tér felé haladó villamos, D – a Szent Gellért tér felől érkező autók, E – a kerékpáros sávok mindkét irányban, F – a gyalogosok járdarésze, G – az alsó rakpart autói a Szabadság-híd irányába, H – az alsó rakpart autói a Lánchíd irányába. Jól látszik a kerékpárosok mellett balra található korlát, valamint a gyalogosok mellett jobbra található kőfal keresztmetszete. Parkoló autó nem állt a lézertérképben.

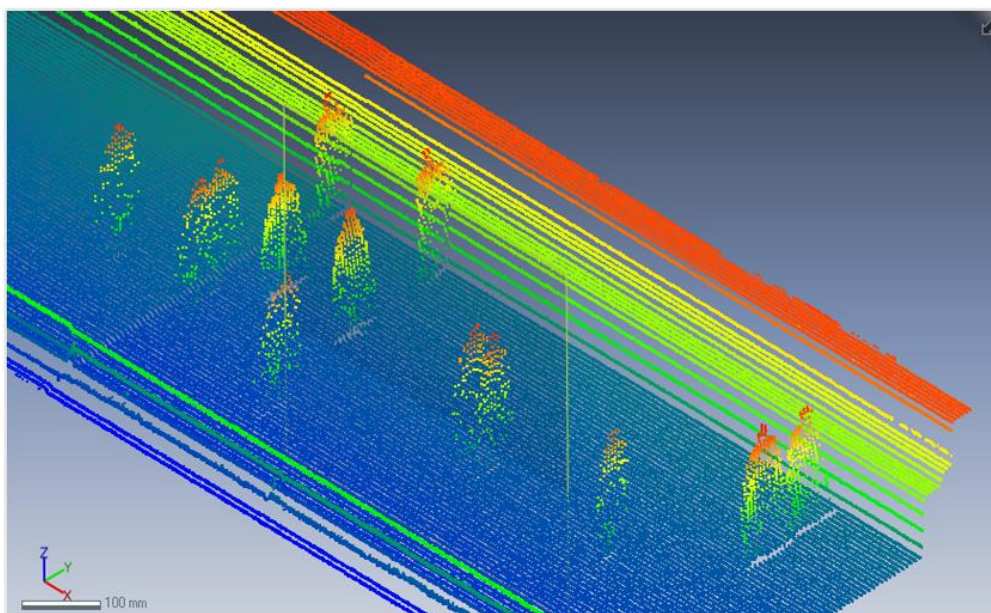
5.35. ábra: Profilszkennerral felvett űrszelvény az Erzsébet-híd északi oldala alatt

Az ezen adatokra is levezetett történeti kép a kerékpárosokat is felismerhetően ábrázolja (5.36. ábra), amint járművükről leszállva tolják azt. Természetesen a nagyobb geometriai méret (szélesség) mérhető, megállapítható. A kerékpársáv forgalmának külön figyelése lehetőséget ad a kerékpáros forgalom mérőszámainak kiszámítására.



5.36. ábra: Kerékpárjukat toló közlekedők történeti képe

A hídról végzett profilmérésekből elő lehet állítani egy olyan megjelenítést is, amelyben térhatásúként látszik a vizsgált időszak forgalma. Az 5.37. ábrán látható, hogy a gyalogosok hogyan követik egymást, de a párban haladó emberek is felismerhetők. Az ábrán a színek a mérésből levezetett magasságokat mutatják. A piros és sárga csíkok jórészt egyenesek, amelyek mozdulatlan tereptárgyakról, pl. villamos felsővezetékéről visszaverődött pontok. Csekély mértékű „redőzöttségük” a műszer mérés alatti rezgését, illetve a távolságmérés bizonytalanságát tükrözik.



5.37. ábra: A gyalogosforgalom lézerszkenneres mérései térbeli ábraként. Az yz-sík a profilsík, míg az x-tengely mentén a mérések időpontjai oszlanak el.

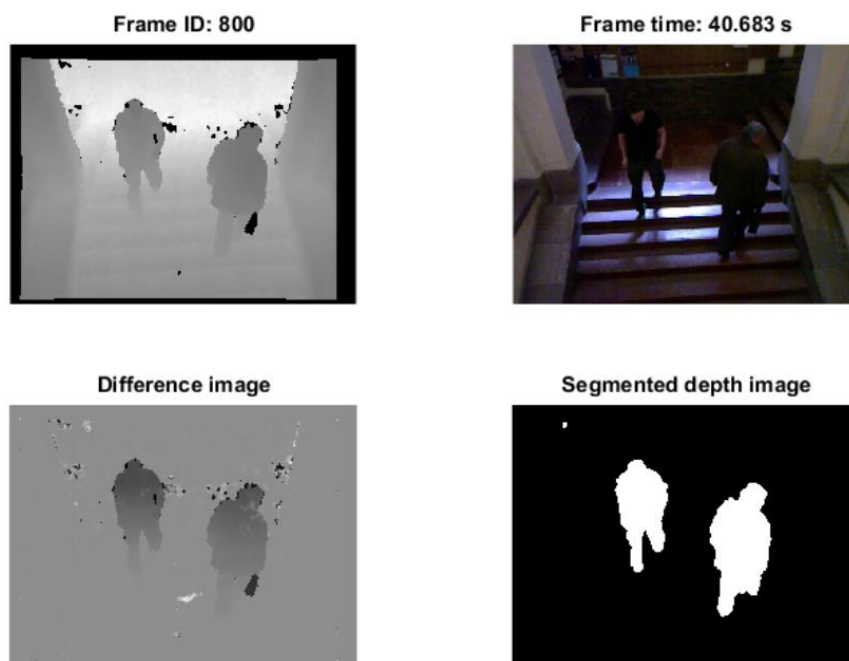
A beltéri gyalogosmegfigyelés céljára a kis mérési távolság, valamint a többnyire mesterséges megvilágítás miatt alkalmasak a strukturált lézerefénnyel dolgozó flash-Lidar eszközök. A nevükben szereplő flash (vaku) arra utal, hogy villanásszerűen bocsátanak ki infravörös lézerefényt, mégpedig egy mintázatot, amit azután egy, az adott tartományban érzékeny kamera segítségével érzékelnek. Ezeknek az eszközöknek a másik elfogadott neve a mélységkamera (*depth camera*), mivel a mintázatot kibocsátó műszerelem, valamint az érzékelő kamera kötött geometriai elrendezésének köszönhetően háromszögeléses technikával távolságértékeket képes meghatározni a mintázat pontjaira. A berendezés eredménye egy raszteres formájú mélységértékeket (azaz távolságokat) tartalmazó adatállomány.



Ebbe a műszercsoportba sorolható a Microsoft Kinect nevű érzékelője, amelyet eredetileg az XBOX játék-konzol kiegészítő perifériájának terveztek. Olcsó kivitele, ugyanakkor kiváló használhatósága és elfogadható pontossága sok kutatási projektben való használatát eredményezte. Kutatásunkban ezért megvizsgáltuk, hogy a már leírt gyalogosforgalom tanulmányozására alkalmas-e.

A berendezéssel a BME folyosóján végeztünk megfigyeléseket. A gyári adatok szerint az eszköz  $640 \times 480$  pixel méretű színes intenzitás- és mélységképet állít elő 30 fps frekvenciával. A többszöri mérések közül a leghosszabb 72 s időtartamot tett ki, ezalatt 1681 kép készült, ami azonban csupán 23.3 Hz-nek felel meg. A tároláshoz szükséges memória mérete szokatlanul nagy, 4.9 GB; ugyanis az eszköz sajátos adatformátumban (könyvtárszerkezetben) tárolja a méréseket (színes képek, mélységképek, mélységi pontok stb.). A 42.8 ms-ként rögzített adatfolyam minden elemére nincs szükség, ám a számunkra rendelkezésre álló meg-hajtó beállításai nem voltak módosíthatók.

A feldolgozás kezdetén egy üres, gyalogostól mentes képsorozatot kerestünk ki, amelyet simítással, szűréssel egyetlen referencia képpé egyszerűsítettünk. A későbbi feldolgozásnál a referencia-képhez viszonyítottuk a mélységértékeket, így gyorsan számítható volt minden képkockára a különbség, azaz a gyalogosok egyszerűen felismerhetők voltak. Az 5.38. ábra mutatja, hogy egy időpillanathoz tartozó intenzitásképpel mennyire van összhangban a mélységkép. Az emberi értelmezéshez és az eljárás kidolgozásához nagy segítség volt a rögzített színes képsorozat is (5.38. ábra).

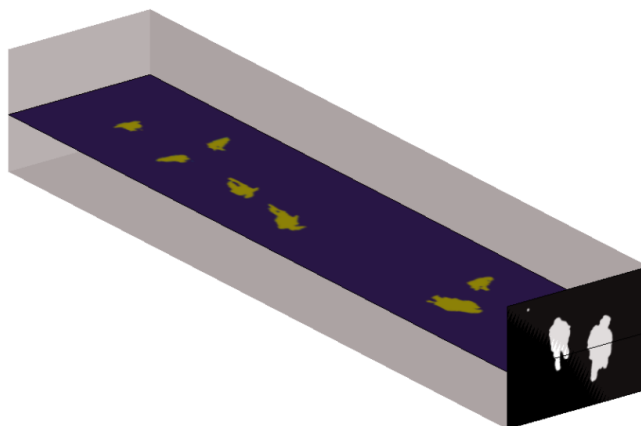


5.38. ábra: Microsoft Kinect mélységkamerával rögzített folyosói jelenet és annak feldolgozási állapotai: a nyers mélységkép (balra fent), a színes intenzitásképp (jobbra fent), a mélységértékek referencia-képhez viszonyított eltérései (balra lent) és a szegmentált mélységkép a gyalogosok foltjaival (jobbra lent)

Az 5.38. ábrán látszik továbbá a különbség a vizsgált képkocka és a referencia között, valamint a differenciakép binarizálásának és morfológiai operátorokkal végzett szűrésének eredménye.

A profilszkennerhez képest a mélységkamera felfogható úgy is, mint egy profilsorozattal működő mérőegység. A mélységkép minden egyes sora vagy oszlopa alkalmas arra, hogy a forgalom történetiségét tanulmányozzuk. Az 5.39. ábrán a mélységképek kiterjesztett adatkockája látható, amelyen belül végzett metszésekkel a raszteres történeti kép előállítható.





5.39. ábra: A mélységkamera 2D+1D dimenziójú kiterjesztett adatkockája, valamint egy metsző síkkal előállított raszteres történeti kép

A történeti ábra birtokában a feladat visszavezethető a korábban kidolgozott eljárásokra (A. Barsi *et al.*, 2016).

## 5.5 Következtetések, tézisek

Az úthálózat geometriai kialakítása, az útpálya jellemzőinek meghatározása és az utakat körülvevő környezet felmérése után az utolsó érzékelési feladatban magukat a közlekedő elemeket vettem célba. A mozgó közlekedő objektumok távérzékeléses vizsgálatát először a járművek detektálására és modellezésére fókuszáltam, majd a gyalogosok érzékelése került sorra. Ebben a munkában az aktív és passzív távérzékelési módszerek egyaránt szerephez jutottak, mivel optikai elven működő látható elektromágneses hullámhossz-tartományban üzemelő műholdas és földi kamerák, valamint infravörös tartományban működő lézerszkennerek segítségével vettem igénybe. A légi és földi lézerszkennelésben profil és flash-lidar berendezéseket használtam, bebizonyítva alkalmasságukat ezen feladatokban. A járművek mozgásának észleléséhez ezen túlmenően a rádiófrekvenciás azonosítás (RFID) technológiáját is teszteltem és végeztem sikeres fejlesztéseket.

**Tézis 4:** Az úthálózaton közlekedő objektumok, elsősorban a járművek és a gyalogosok mérésére távérzékelési módszereket alkalmazó modell-alapú érzékelési és felismerési rendszereket és technológiákat dolgoztam ki.

A tézis első altézise a járműérzékelésre és felismerésre szolgáló távérzékeléses modelleket alkotta meg, majd alkalmazta változatos körülmények között. Ezután a mozgó járművek viselkedésének leírásához a vizuális odometria és a GNSS-alapú mérések területén fejlesztettem módszereket, és térinformatikai elemzési eljárásokat. Altézisben foglaltam össze az RFID alkalmazásával megvalósított módszereket és alkalmazásokat. Külön altézist állítottam fel a gyalogosok bel- és kültéren folytatott detektálására, amelyben kamerás és lézerszkennerekre alapozott távérzékelési megoldásokat dolgoztam ki és implementáltam.

A fejezetben bemutatott kutató munkába intenzíven kapcsolódott be Krausz Nikol fokozatot szerzett és Potó Vivien jelenlegi doktorandusz hallgatóim, Rakusz Ádám és Szele András doktoranduszok és Kovács Ervin diplomázó hallgatóm. Kiváló együttműködésben dolgoztam ezen a területen Lovas Tamás és Molnár Bence tanszéki, továbbá Kisgyörgy Lajos kari kollégáimmal.



## 6 Összefoglalás és kitekintés

Értekezésem bevezető fejezetében megfogalmaztam a tudományos kutatás lehetséges fókuszterületeit, majd az egymást követő fejezetekben bemutatam a kutatások eszközeit, módszereit, eredményeit és következtetéseit. A céloknál megfogalmazott pontokat az alábbiakban kívánom megválaszolni.

A térinformatikai rendszerek elemzési eszközeivel az adatokban rejlő információ kinyerése és így értéknövelt termékek levezetése várható. Ennek a célnak a megvalósítására hoztam létre különféle területre kiterjedő, különböző skálájú gráf-alapú rendszereket. Segítségükkel egyszerűbb lekérdezések, pl. baleseti gyakoriságok kimutatása történhet meg, de akár képekkel és haladási instrukciókkal kiegészített navigációs környezet is kialakítható.

A fotogrammetria képek gyűjtésével végzi a környezeti adatok rögzítését. Az egyképes vagy többképes (sztereo) fotogrammetria így természeténél fogva alkalmas akár az infrastruktúra, az azt körülvevő valóság vagy a közlekedő személyek és tárgyak dokumentálására, megmérésére. A kamerák elhelyezésével számos különleges alkalmazás alakítható ki, ezekre példák a monitoring rendszerek (gyalogosokkal vagy járművekkel), a drónos épület- vagy városmodellezési projektek. Kifejezetten felmérő rendszer szintén kialakítható fotogrammetriai technológiák integrálásával burkolati jellemzők megállapítása érdekében. Repülőgépes vagy műholdas mérésekkel optikai képek nagyobb területek homogén minőségű és gyors kiértékelése válik lehetségessé.

A képfeldolgozás mára már kizárólag digitális értelemben használt. Egy tudományterület, amely számos kutatásban, felhasználásban rendkívül hatékonyan segíti a munkát. Ez természetesen érvényes a képeket gyűjtő távérzékelésre is. A képtranszformációk, szegmentálási és más elemzési módok, adattranszformációk képzik azokat az eljárásokat, amelyek a távérzékelte képek feldolgozásában a lényegyet kiemelik. Sajátos megoldások kutatása szintén izgalmas kutatást hozott, például az orvosi gyakorlatban használt számítógépes tomográfia módszerével a burkolati furatminták elemzése ad használatható gyakorlati ismereteket.

A robbanásszerű fejlődésen keresztülment lézerszkennelés friss eszközt képez a távérzékelés és a térinformatika palettáján. Légi, földi vagy mobil platformon üzemelő profil vagy flash-elven működő berendezések hatalmas adatmennyiséget jelentő pontfelhőket hoznak létre. A pontfelhők hatékony feldolgozásában számtalan izgalmas megoldás kipróbálása, továbbá újak kifejlesztése vonzza a kutatót. Síkbeli és térbeli geometriai, numerikus (pl. elhaladó gyalogosok száma) vagy minőségi (pl. járműtípus) információk igen változatos gyakorlati felhasználásban találják meg helyüket.

A közúti közlekedés térinformatikájánál a legtöbbit használt, bár nem mindenki által tudatos alkalmazás a navigáció. Ehhez adatmodell, műholdas és inerciális mérés technika, vagy akár rádiófrekvenciás azonosítás kapcsolódhat. Az alpmérések elvégzése után azok feldolgozása zárt algoritmusokon keresztül vagy akár újszerű megoldásban ölthet testet. Nemritkán adatfúziós eljárásnál találja magát a kutató, ami szinte általános a GNSS és IMU adatok feldolgozásában. A Kálmán-szűrővel végzett fúzió azonban csak egy olyan becslési eljárás, ami a közlekedésben így eredményes lehet. Hasonlóképp kiválóan alkalmazható a járművek vagy gyalogosok követésére, trajektóriáik simítására is.

A mesterséges intelligencia ma már nem kihagyható a változatos adatokkal operáló térinformatika és a közlekedés világából. A neurális hálózatok szerteágazó megvalósulásai (hibavisszaosztásos, radiális bázisú vagy SVM) kitűnő eszközök adataink megértésében, feldolgozásában. A neurális hálózatok világában az önszerveződés (pl. SOM vagy neurális gáz) önmagában hatékony technikák, továbbfejlesztésükkel (SONG) a rugalmasságukat is bizonyítani lehet. A genetikai algoritmusok vagy a szakértői rendszerek szintén a mesterséges intelligencia eszköztárát képezik, s a képértelmezésben tesznek jó szolgálatot.

Mindezek alapján úgy gondolom, hogy értekezésemmel sikerült igazolnom azt, hogy a térinformatika és a közlekedés szerencsés módon összekapcsolható. A képek, pontfelhők előállítása, majd feldolgozása számára megfelelő eszközökből lehet választani a távérzékelés területéről, a digitális képfeldolgozás/elemzés/értés világából. A mesterséges intelligencia révén a bonyolultan leírható emberi tudás algoritmusokban ölthet testet és egészítheti ki a klasszikus adatfeldolgozás műveleteit.

Nem hiszem, hogy munkámmal minden elképzelhető kooperációs lehetőséget kimerítettem volna a térinformatika, a távérzékelés és a közúti közlekedés viszonyában. Abban azonban biztos vagyok, hogy ennek a három diszciplínának az együtteséből még nagyon sok további eredmény várható. Tudományos kutatásom így ezen a közlekedési térinformatikának nevezhető területen még folytatható. Ha a napjainkban annyira várt autonóm közlekedésre és az önvezetésre gondolunk, a környezet érzékelése, térképezése, elemzése és megértése a mesterséges intelligencia eszközeivel kiegészítve egységében fogja kezelni az általam csak meg-sejtett világot.

## 7 Új tudományos eredmények

### Úthálózati elemek térképezése

**Tézis 1:** Módszertant dolgoztam ki közúthálózat elemeinek detektálására és térképezésére képfeldolgozási és mesterséges intelligencia eszközök használatával.

**Altézis 1.1:** Útdetektálási algoritmusokat fejlesztettem képfeldolgozási eszközök és mesterséges intelligencia kombinációjával, felhasználva a genetikus algoritmusokat és a növekvő neurális gázokat (*Growing Neural Gas*).

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Barsi, 2008, 2012b)

**Altézis 1.2:** Úthálózati csomópontok felismerésére eljárást fejlesztettem klasszikus képfeldolgozási műveletek és mesterséges neurális hálózat alkalmazásával, elsősorban Hough- és Radon-transzformáció, továbbá JEANS neurális technológiák segítségével.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Barsi, Heipke & Willrich, 2002; Arpad Barsi & Heipke, 2003; Tóth & Barsi, 2005; A. Barsi, 2011)

**Altézis 1.3:** Új neurális hálózattípust, az önszerveződő neurongráfot (*Self-Organizing Neuron Graph* – SONG) dolgoztam ki, amelynek neuronszerkezete gráffal adható meg, tanulási algoritmus pedig a Kohonen-féle önszerveződésen alapszik.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (A Barsi, 2003; A. Barsi, 2003b)

**Altézis 1.4:** SONG-típusú neurális hálózatot alkalmaztam közlekedési csomópontok detektálására.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (A. Barsi, 2004; Arpad Barsi, 2004b)

### Az útpálya jellemzőinek mérése és térképezése

**Tézis 2:** Az útpálya felületi és szerkezeti jellemzőinek meghatározására integrált mérőrendszert fejlesztettem és megfelelő módszertant dolgoztam ki.

**Altézis 2.1:** Sztereofotogrammetriai alapú mobil útburkolati felmérő rendszert terveztem és építtettem.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Barsi, 2001; Barsi, Fi, Mélykúti, Lovas, *et al.*, 2005; Barsi, Lovas & Kertész, 2006; T. Lovas *et al.*, 2007; Kertész, Lovas & Barsi, 2008; Lovas, Kertész, *et al.*, 2008)

**Altézis 2.2:** Kidolgoztam egy monokamerás és lézerprojektoros mobil felmérő rendszer koncepciótervét és igazoltam alkalmazhatóságát útpálya felületi jellemzőinek mérésére.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Kertész & Barsi, 2010, 2012)



**Altézis 2.3:** Az útburkolaton található sávhatárok és a pálya felületi jellemzőinek meghatározására földi és mobil lézerszkennelésen alapuló módszertant dolgoztam ki.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Barsi *et al.*, 2017; Barsi, Poto & Tihanyi, 2018; Potó, Csepinszky & Barsi, 2018)

### Az úthálózat környezeti elemeinek térképezése

**Tézis 3:** Optikai és lézerszkenneléses távérzékelési módokat dolgoztam ki úthálózat környezetének nagyfelbontású és nagy pontosságú térképezésére.

**Altézis 3.1:** Útkörnyezet felszínborítottsági térképezésére mesterséges neurális hálózati technológiát dolgoztam ki.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Barsi, Gáspár & Szepessy, 2010; Neuberger, Barsi & Juhász, 2015)

**Altézis 3.2:** A járműirányításban használt statikus foglaltsági térkép előállítására lézerszkennelt pontfelhő-feldolgozó technológiát fejlesztettem ki.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Barsi *et al.*, 2018)

**Altézis 3.3:** Nagyfelbontású háromdimenziós útkörnyezeti modellt fejlesztettem ki légifényképezésre, valamint földi és mobil lézerszkennelésre alapozottan.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Lovas, Takács & Barsi, 2003; Kugler, Láday & Barsi, 2004; Tóth *et al.*, 2004; Molnar *et al.*, 2015; Potó & Barsi, 2017b; Potó *et al.*, 2017; Somogyi, Lovas & Barsi, 2017)

### Közlekedő objektumok távérzékelése és térinformatikája

**Tézis 4:** Az úthálózaton közlekedő objektumok, elsősorban a járművek és a gyalogosok mérésére távérzékelési módszereket alkalmazó modell-alapú érzékelési és felismerési rendszereket és technológiákat dolgoztam ki.

**Altézis 4.1:** Távérzékelésen alapuló modelleket készítettem és alkalmaztam járműérzékelésre és felismerésre.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Lovas, Barsi & Toth, 2004; Lovas, C.K. Toth & Barsi, 2004; Rakusz, Lovas & Barsi, 2004; Lovas *et al.*, 2005; Szele, Barsi & Kisgyörgy, 2016)

**Altézis 4.2:** A mozgó járművek viselkedésének elemzéséhez távérzékelési/térinformatikai módszereket implementáltam, elsősorban a vizuális odometria és a GNSS-alapú mérések köréből.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Barsi & Lovas, 2004; Potó & Barsi, 2017a)

**Altézés 4.3:** Kidolgoztam a rádiófrekvenciás azonosítás (RFID) közlekedésbiztonsági alkalmazására szolgáló technológiát és kísérletekkel igazoltam a gyakorlati használhatóságot.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (Krausz & Barsi, 2007; Barsi, Lovas & Krausz, 2009; Krausz, Lovas & Barsi, 2017; N. Krausz & Barsi, 2017)

**Altézés 4.4:** Kamerás és lézerszkenneres távérzékelési technológiákat fejlesztettem gyalogosok automatikus bel- és kültéri detektálására.

A tézis alapjául szolgáló publikációk: (A. Barsi *et al.*, 2016; Arpad Barsi *et al.*, 2016)



## Köszönetnyilvánítás

Dolgozatomból nem maradhat ki, hogy mennyi köszönettel tartozom sok-sok embernek. Elsőként Detrekői Ákos professzor úrnak vagyok hálás, aki első bátortalan lépteimet segítette a BME-n, majd külföldi ösztöndíjakhoz segített, később „Doktorvater”-em lett. Tudományos életem irányítója volt, büszkén vallo magam tanítványának. Nagyon sok biztatást kaptam dolgozatom elkészítéséhez Lovas Antal volt dékán úrtól, aki a maga fanyar stílusában igazított el kezdő tanszékvezetőként is. Jelenlegi dékánom, Dunai László szűrősszemű ösztöndíze nélkül aligha készülhettem volna el. A kutatásban rengeteget köszönhetek külföldi partnereinknek is. Christian Heipke professzor úr és barátom szinte inkubátort biztosított számomra, ahány-szor Hannoverben dolgoztam. Hans Peter Bähr és Karl Kraus professzor urak tették otthonossá az életemet és munkámat Karlsruheban és Bécsben.

A Tanszéken Lovas Tamás kollégám és barátom állandó harcostársként állt mellettem, s akitől nemcsak az autós ismereteim jó részét, de a szabad és kritikus értékelést is tanultam. Somogyi Árpád fiatal kollégám szívvel-lélekkel vetette bele magát a kutatásba; számos lézerszkenneléses és képfeldolgozási eredményt együtt értünk el. Egykori és jelenlegi doktoranduszaim voltak és máig azok, akikkel a közös gondolkodás és szívós munka a felemelő pillanatok mellett publikációkat és eredményeket hozott. Kapitány Kristóf, Kertész Imre, Krausz Niko, Molnár Bence és Potó Vivien nevét kell megemlítenem. Természetesen a Tanszék többi egykori és mostani dolgozója egyaránt velem voltak, amikor a saját kis kutatásaimat végeztem, számos kávézárkor beszélünk meg egy-egy szakmai problémát is.

Nem maradhatnak ki az Építőmérnöki Kar kollégái sem, név szerint Fi István, Lublói Éva és Takács Bence. Persze rajtuk kívül még sokak segítettek, dolgoztak, közreműködtek. A BME más karairól a Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karról Nyerges Ádám, Szalay Zsolt és Tihanyi Viktornak tartozom köszönettel. Egészen biztosan vannak még számosan olyanok is, akik a sietségben kimaradtak a név szerinti listából, pedig nekik is hálás vagyok; kérem tudják be súlyos mulasztásomat hézagos emlékezetemnek.

A dolgozat szakmai anyagában kevés helyen jelenik meg konkrétan, mégis szemléletet rendkívül sokat sajátítottam el Csepinszky András barátomtól, akivel a gimnáziumban hosszú időt töltöttünk el együtt, majd több évre rá az intelligens közlekedés és a jövő megoldásai hoztak minket újból össze.

A kézirat elkészítésében két BME-professzort kell nevesítenem. Kiss Rita professzorasszony rendkívül alaposan elbánt az első kéziratom szövegével, s neki köszönhetem, hogy most én is úgy érzem, hogy sokkal jobb és érthetőbb lett. Charaf Hassan professzor úr, barátom pedig az informatikai világlátásomat formálta, még akkor is, ha nem is vette észre. Határozott, karakán véleményével röviden fejezte ki, hogy alapos átdolgozásra szorul a mű. Hálás köszönet érte!

A munkám egy részének egész bizonyosan ösztöndíjak és támogatások adták a megvalósíthatóságot: MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, Alexander von Humboldt kutatási ösztöndíj, Felsőoktatási Kutatásfejlesztési Program, EU 6. és 7. keretprogramok és INTAS program, Nemzeti Kutatásfejlesztési Program, Társadalmi Megújulás Operatív Program, Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program és még sokan mások.

Végül a családomnak is köszönettel tartozom, elsősorban feleségemnek Zsuzsának, aki elviselte a tudósokdásra fordított időmet, megértette és mindenben támogatott ebben a küzdelemben. Felcseperedő gyerekeim pedig eltűrték, hogy apa esténként rohan a számítógépéhez. Apósomnak és anyósomnak is köszönöm, hogy megértették, miért hordok mindig magammal számítógépet és egyszer-egyszer inerciális mérőegységet. Szüleimnek köszönöm, hogy szeretve hagyták érdeklődésemet kibontakozni, elfogadták, hogy nekem valami ilyesmit kell tennem.

Nagyon szépen köszönöm!





## Irodalomjegyzék

- Bakos, Ferenc & Fábián, Pál. (1989) *Idegen szavak és kifejezések szótára*. Akadémiai Kiadó
- Barsi, A. (2003a) 'Graph Based Neural Self-Organization in Analyzing Remotely Sensed Images', in IEEE (ed.) *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2003*. New York: IEEE Press, pp. 3937–3939. Available at: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1295320](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1295320).
- Barsi, A (2003) 'Neural Self-Organization in Processing High-Resolution Image Data', in *EARSEL*, pp. 1–6
- Barsi, A. (2003b) 'Neural self-organization using graphs', in *Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science)*
- Barsi, A. (2003c) 'Neural Self-Organization Using Graphs', *LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE*, Vol. 2734, pp. 343–352
- Barsi, A. (2004) 'Generalization of topology preserving maps: A graph approach', in *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*
- Barsi, A. (2011) 'City structure analysis on Quickbird imagery by multiscale radon transformation', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*
- Barsi, A. (2012a) 'Road Detection By Neural and Genetic Algorithm in Urban Environment', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIX-B3, No. September, pp. 247–252. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-247-2012.
- Barsi, A. (2012b) 'ROAD DETECTION BY NEURAL AND GENETIC ALGORITHM IN URBAN ENVIRONMENT', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Copernicus GmbH, Vol. XXXIX-B3, pp. 247–252. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-247-2012.
- Barsi, A. & Heipke, C. (2003) 'Detecting road junctions by artificial neural networks', *2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, URBAN 2003*, pp. 129–132. doi: 10.1109/DFUA.2003.1219972.
- Barsi, A., Lovas, T., Molnar, B., Somogyi, A. & Igazvolgyi, Zs. (2016) 'Pedestrian detection by laser scanning and depth imagery', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Vol. 41, pp. 465–468. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B3-465-2016.
- Barsi, A., Poto, V. & Tihanyi, V. (2018) *Creating OpenCRG road surface model from terrestrial laser scanning data for autonomous vehicles*, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. doi: 10.1007/978-3-319-75677-6\_30.
- Barsi, Arpad (2004a) 'Generalization of Topology Preserving Maps: A Graph Approach', in IEEE (ed.) *Neural Networks 2004. Proceedings of the IEEE International Joint Conference Vols 1-4*. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 809–813
- Barsi, Arpad (2004b) 'Object detection using neural self-organization', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXV, No. 3, pp. 366–371
- Barsi, Arpad (2008) 'Road network detection by growing neuron gas', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXVII, No. B3b, pp. 545–548
- Barsi, Arpad (2011) 'City Structure on Quickbird Imagery by Multiscale Radon Transformation', in *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*. Hannover CL - Hannover CC - Németország, pp. 1–4
- Barsi, Árpád (1999) 'Koordináta-transzformáció megoldása neurális hálózattal', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRAFIA*, Vol. LI, No. 10, pp. 12–18
- Barsi, Árpád (2001) 'Performing coordinate transformation by artificial neural network', *ALLGEMEINE VERMESSUNGS-NACHRICHTEN*, Vol. 108, No. 4, pp. 134–137
- Barsi, Árpád (2006) 'Thematic mapping by classifying satellite imagery', in Zentai, L., Györfy, J., and Zs, T. (eds). Budapest: ELTE, pp. 43–48
- Barsi, Árpád, Fi, István, Mélykúti, Gábor & Lovas, Tamás (2005) 'Úthibák detektálása - Mobil felmérő rendszer fejlesztése a BME-n', *MÉLYÉPÍTŐ TÜKÖRKÉP*, Vol. 2005, No. 3, pp. 32–33

- Barsi, Árpád, Fi, István, Mélykúti, Gábor, Lovas, Tamás & Tóth, Zoltán (2005) 'Az útburkolat hibáinak detektálása', *MÉLYÉPÍTŐ TÜKÖRKÉP*, pp. 2–4
- Barsi, Árpád, Gáspár, Katalin & Szepessy, Zsuzsanna (2010) 'Unsupervised classification of high resolution satellite imagery by self-organizing neural network', *ACTA GEOGRAPHICA DEBRECINAE LANDSCAPE AND ENVIRONMENT*, Vol. 4, No. 1, pp. 37–43. Available at: [http://landscape.geo.klte.hu/pdf/agd/2010/2010v4is1\\_4.pdf](http://landscape.geo.klte.hu/pdf/agd/2010/2010v4is1_4.pdf).
- Barsi, Arpad & Heipke, Christian (2003) 'Detecting road junctions by artificial neural networks', *2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, URBAN 2003*. Edited by IEEE. New York: IEEE Press, pp. 129–132. doi: 10.1109/DFUA.2003.1219972.
- Barsi, Árpád & Heipke, Christian (2003) 'Artificial neural networks for the detection of road junctions in aerial images', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXIV, No. 3/W8, pp. 113–118
- Barsi, Arpad, Heipke, Christian & Willrich, Felicitas (2002) 'JUNCTION EXTRACTION BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK SYSTEM – JEANS', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXIV, No. 3B, pp. 18–21
- Barsi, Árpád & Lovas, Tamás (2004) 'Térinformatika a közlekedésben', *GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK*, Vol. 7, pp. 91–98
- Barsi, Árpád, Lovas, Tamás & Bakos, Gábor (2003) 'Mapping of city traffic network from digital aerial images', in Benes, T. (ed.) *Geoinformation for European-wide Integration*. Rotterdam: Millpress Science Publishers, pp. 659–664
- Barsi, Arpad, Lovas, Tamas, Igazvölgyi, Zsuzsanna & Radóczy, Karoly (2016) 'Automatic pedestrian trajectory detection to support planning', in *Imaging and Geospatial Technology Forum, IGTF 2016*. Fort Worth: ASPRS
- Barsi, Árpád, Lovas, Tamás & Kertész, Imre (2006) 'The Potential of Low-End IMUs for Mobile Mapping Systems', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXVI, No. 1/A+B, pp. 1–4
- Barsi, Árpád, Lovas, Tamás & Krausz, Nikol (2009) 'Forgalommal szembehajtó jármű detektálása RFID segítségével', *GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK*, Vol. XII, pp. 211–216
- Barsi, Árpád, Nyerges, Ádám, Potó, Vivien & Tihanyi, Viktor (2018) 'AN OFFLINE PATH PLANNING METHOD FOR AUTONOMOUS VEHICLES', *Production Engineering Archives*, Vol. 19, pp. 37–42. doi: 10.30657/pea.2018.19.08.
- Barsi, Arpad, Poto, Vivien, Somogyi, Arpad, Lovas, Tamas, Tihanyi, Viktor & Szalay, Zsolt (2017) 'Supporting autonomous vehicles by creating HD maps', *PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES*, Vol. 16, pp. 43–46
- Barzohar, M. & Cooper, D. B. B. (1993) 'Automatic Finding of Main Roads in Aerial Images by Using Geometric -- Stochastic Models and Estimation', *Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE Comput. Soc. Press, pp. 459–464. doi: 10.1109/CVPR.1993.341090.
- Bauer, Dietmar & Kitazawa, Kay (2010) 'Using Laser Scanner Data to Calibrate Certain Aspects of Microscopic Pedestrian Motion Models', in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 83–94. doi: 10.1007/978-3-642-04504-2\_6.
- Baumgartner, A., Steger, C., Wiedemann, C., Mayer, H., Eckstein, W. & Ebner, H. (1996) 'Road extraction for update of GIS from aerial imagery: A two-phase two-resolution approach', *Int.ArchPhRS*, Vol. 31, No. B3
- Benedek, Csaba (2014) '3D people surveillance on range data sequences of a rotating Lidar', *Pattern Recognition Letters*. Elsevier Science Inc., Vol. 50, No. C, pp. 149–158. doi: 10.1016/j.patrec.2014.04.010.
- Berényi, Attila, Lovas, Tamás, Barsi, Árpád & Dunai, László (2009) 'Potential of Terrestrial Laserscanning in Load Test Measurements of Bridges', *Periodica Polytechnica: Civil Engineering*, Vol. 53, No. 1, pp. 25–33. doi: 10.3311/pp.ci.2009-1.04.
- Bernhardsen, Tor. (1992) *Geographic information systems*. Viak IT. Available at: [https://books.google.hu/books/about/Geographic\\_Information\\_Systems.html?id=2OQsAQAA\\_MAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.hu/books/about/Geographic_Information_Systems.html?id=2OQsAQAA_MAAJ&redir_esc=y) (Accessed: 27 August 2017).
- Biljecki, Ir Filip (2013) 'The concept of level of detail in 3D city models, PhD Research Proposal', *GIS Report*, No. 62. Available at: <http://www.gdmc.nl/publications/reports/GIS62.pdf> (Accessed: 27 August 2017).

- Blaschke, T. (2010) 'Object based image analysis for remote sensing', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, No. 1, pp. 2–16. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.
- Bossler, J. D. & Toth, C. (1996) 'Feature positioning accuracy in mobile mapping: results obtained by the GPSvan', *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31, No. Part 4, pp. 139–142.
- Brenner, Claus (2000) *Dreidimensionale Gebaudeskonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen*. Stuttgart
- Butenuth, M. (2008) 'Topology-preserving network snakes', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, No. Part 3a, pp. 229–234
- Campbell, James B. & Wynne, Randolph H. (2011) *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.  
Available at: <https://www.amazon.com/Introduction-Remote-Sensing-Fifth-Campbell/dp/160918176X> (Accessed: 1 September 2017).
- Cessford, Gordon & Muhar, Andreas (2003) 'Monitoring options for visitor numbers in national parks and natural areas', *Journal for Nature Conservation*. Urban & Fischer, Vol. 11, No. 4, pp. 240–250. doi: 10.1078/1617-1381-00055.
- Chen, Jun, Dowman, Ian, Li, Songnian, Li, Zhilin, Madden, Marguerite, Mills, Jon, Paparoditis, Nicolas, Rottensteiner, Franz, Sester, Monika, Toth, Charles, Trinder, John & Heipke, Christian (2016) 'Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS), Vol. 115, pp. 3–21. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.09.008.
- Detrekői, Ákos & Szabó, György (2002) *Térinformatika*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó
- Detrekői, Ákos & Szabó, György (2013) *Térinformatika - Elmélet és alkalmazások*. Budapest: Typotex Kiadó
- DigitalGlobe (2017) *WorldView-4, web page*. Available at:  
<http://worldview4.digitalglobe.com/#/main> (Accessed: 1 September 2017).
- Duda, Richard O., Hart, Peter E. & Stork, David G. (2001) *Pattern classification*. Wiley
- Finkenzeller, Klaus (2003) *RFID Handbook*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/0470868023.ch11.
- Fritzke, Bernd (1995) 'A Growing Neural Gas Network Learns Topologies', in Tesauro, G., Touretzky, D. S., and Leen, T. K. (eds) *Advances in Neural Information Processing Systems 7*. MIT Press, pp. 625–632. Available at: <http://papers.nips.cc/paper/893-a-growing-neural-gas-network-learns-topologies.pdf>.
- Fritzke, Bernd (1998) *Vektorbasierte Neuronale Netze*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Fuerstenberg, Kay & Lages, Ulrich (2002) 'Pedestrian Detection and Classification by Laserscanners', in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, pp. 1–8. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/0ce6/1ab1609bedcc244184fa0084f0ef9f553867.pdf> (Accessed: 13 August 2018).
- Furukawa, Yasutaka & Ponce, Jean (2010) 'Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, No. 8, pp. 1362–1376. doi: 10.1109/TPAMI.2009.161.
- Garnesson, P., Giraudon, G. & Montesinos, P. (1990) 'An image analysis, application for aerial imagery interpretation', in [1990] *Proceedings. 10th International Conference on Pattern Recognition*. IEEE Comput. Soc. Press, pp. 210–212. doi: 10.1109/ICPR.1990.118094.
- Gate, Gwennael & Nashashibi, Fawzi (2008) 'Using targets appearance to improve pedestrian classification with a laser scanner', in *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, pp. 571–576. doi: 10.1109/IVS.2008.4621253.
- Geman, Donald & Jedynak, Bruno (1996) 'An active testing model for tracking roads in satellite images', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 1, pp. 1–14. doi: 10.1109/34.476006.
- Gidel, Samuel, Checchin, Paul, Blanc, Christophe, Chateau, Thierry & Trassoudaine, Laurent (2010) 'Pedestrian Detection and Tracking in an Urban Environment Using a Multilayer Laser Scanner', *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 579–588. doi: 10.1109/TITS.2010.2045122.
- GIS-T (2016) *Survey Results & Analysis for 2016 GIS-T Survey & State Roll Call, web page*. Available at: [http://www.gis-t.org/uploads/2016 GIST Survey and Roll Call - Report.pdf](http://www.gis-t.org/uploads/2016%20GIST%20Survey%20and%20Roll%20Call%20-%20Report.pdf).

- Di Gregorio, Antonio. & Jansen, Louisa J. M. (2000) *Land cover classification system : LCCS : classification concepts and user manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm> (Accessed: 27 August 2017).
- Gruen, A. & Li, H. (1994) 'Semi-Automatic Road Extraction by Dynamic Programming', *Proceedings of the SPIE*, Vol. 2357, pp. 324–332
- Hartley, Richard & Zisserman, Andrew (2003) *Multiple view geometry in computer vision*. Available at: <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/hzbook/> (Accessed: 27 August 2017).
- Havasi, László, Szilávik, Zoltán & Szirányi, Tamás (2007) 'Detection of gait characteristics for scene registration in video surveillance system', *IEEE Transactions on Image processing*, Vol. 16, No. 2, pp. 503–510. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17269642> (Accessed: 13 August 2018).
- Heipke, C., Englisch, A., Speer, T., Stier, S. & Kutka, R. (1994) 'Semi-Automatic Extraction of Roads from Aerial Images', *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 30, No. Part 3/1, pp. 353–360
- Henley, E. J. & Williams, R. A. (1973) *Graph Theory In Modern Engineering*. Academic Press. Available at: <https://archive.org/details/GraphTheoryInModernEngineering>.
- Hinz, S., Baumgartner, A., Mayer, H., Wiedemann, C. & Ebner, H. (2001) 'Road extraction focussing on urban areas', in E.P. Baltsavias, A. Gruen, L. V. (ed.) *Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Satellite Images III*. Balkema. Available at: <https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=kjI4k58eOl4C&oi=fnd&pg=PA255&ots=QPWgAp4XHH&sig=gj-o40It8AWP0FXUYIntRtIK3eE#v=onepage&q&f=false> (Accessed: 27 August 2017).
- Hinz, S., Kurz, F., Baumgartner, A. & Wasmeier, P. (2001) 'The Role of Shadow for 3D-Object Reconstruction from Monocular Images', in Kahmen, H., Grun, A. (Hrsg.), *3D-Optical Measurement Techniques (V)*, pp. 354–363
- Hinz, Stefan. (2004) *Automatische Extraktion urbaner Straßennetze aus Luftbildern*. Verl. der Bayerischen Akad. der Wiss
- Hinz, Stefan (2003) 'Integrating local and global features for vehicle detection in high resolution aerial imagery', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, Vol. 34, pp. 119–124. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.97.7312> (Accessed: 23 September 2018).
- Hinz, Stefan & Baumgartner, Albert (2001) 'Vehicle Detection in Aerial Images Using Generic Features, Grouping, and Context', in. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 45–52. doi: 10.1007/3-540-45404-7\_7.
- Kaewtrakulpong, P. & Bowden, R. (2001) 'An Improved Adaptive Background Mixture Model for Real-time Tracking with Shadow Detection', *Advanced Video Based Surveillance Systems*, pp. 1–5. doi: 10.1.1.12.3705.
- Kapitany, Kristof & Barsi, Arpad (2016) 'Fourier transformation-based CT correction method for geomaterial core samples', *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 1. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001349.
- Kertész, Imre (2011) *Útállapot felmérés integrált mérőrendszerrel*. BME
- Kertész, Imre & Barsi, Árpád (2007) 'ÚTBURKOLAT - FELMÉRÉS MOBIL TÉRKÉPEZŐ RENDSZERREL', *Geomatikai Közlemények*, pp. 3–9
- Kertész, Imre & Barsi, Árpád (2010) 'Tárgyrekonstrukció egy kamera és lézer segítségével', *GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK*, Vol. XIII/1, pp. 51–57
- Kertész, Imre & Barsi, Árpád (2011) 'Kálmán-szűrés alkalmazása épületen belüli és kültéri mérésekre', *GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK*, Vol. XIV/1, pp. 81–87
- Kertész, Imre & Barsi, Árpád (2012) 'Egykamerás objektum-rekonstrukció új módszere', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRAFLA*, Vol. LXIV, No. 3–4, pp. 9–12
- Kertész, Imre, Lovas, Tamás & Barsi, Árpád (2008) 'Photogrammetric pavement detection system', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXVII, No. B5, pp. 897–902. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.184.2604&rep=rep1&type=pdf>.
- Kisfaludi, Balázs (2004) 'Determining forest road traffic by camera surveillance', *Erdészettudományi Közlemények*, Vol. 4, No. 1, pp. 135–145. Available at:

- <http://www.nyme.hu/index.php/26471/?&L=1> (Accessed: 13 August 2018).
- Kohonen, Teuvo (1995) *Self-Organizing Maps*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Series in Information Sciences). doi: 10.1007/978-3-642-97610-0.
- Koppányi, Z., Lovas, T., Barsi, A., Demeter, H., Becharee, A. & Berenyi, A. (2012) 'TRACKING VEHICLE IN GSM NETWORK TO SUPPORT INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Copernicus GmbH, Vol. XXXIX-B2, No. B2, pp. 139–144. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B2-139-2012.
- Kovács, Ervin (2005) *Tárgyrekonstrukció lézerszkennelés alkalmazásával*
- Kraus, Karl & Waldhäusl, Peter (1998) *Fotogrammetria : alapok és általános módszerek*. Tertia. Available at: <https://moly.hu/konyvek/karl-kraus-fotogrammetria> (Accessed: 27 August 2017).
- Krausz, N. & Barsi, Á. (2017) 'Analysis of ghost driver hazard of road junctions by graph technique', *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, Vol. 45, No. 4. doi: 10.3311/PPtr.10906.
- Krausz, Nikol & Barsi, Árpád (2007) 'Rádiófrekvenciás azonosítás a közlekedés biztonságának támogatására', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRAFIA*, Vol. LIX, No. 8–9, pp. 24–28
- Krausz, Nikol & Barsi, Árpád (2017) 'Analysis of Ghost Driver Hazard of Road Junctions by Graph Technique', *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. doi: 10.3311/PPtr.10906.
- Krausz, Nikol, Lovas, Tamás & Barsi, Árpád (2017) 'Radio Frequency Identification in Supporting Traffic Safety', *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. doi: 10.3311/PPci.10114.
- Kugler, Zsófia & Barsi, Árpád (2005) 'Automatikus fotogrammetriai eljárással előállított digitális terepmodell beépített környezetben', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRAFIA*, Vol. 57, No. 12, pp. 12–17
- Kugler, Zsófia, Láda, András & Barsi, Árpád (2004) 'Digitális magasságmodellek összehasonlítása városi környezetben', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRAFIA*, Vol. 56, No. 10
- Laky, Sándor (2012) *Metabeurisztikus optimalizáció a geodéziában*. Available at: <https://www.google.hu/search?q=laky+sándor+PhD+értekezés&oeq=laky+sándor+PhD+értekezés&aq=chrome..69i57.8567j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8> (Accessed: 15 August 2018).
- Leibe, B., Seemann, E. & Schiele, B. (2005) 'Pedestrian Detection in Crowded Scenes', in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. IEEE, pp. 878–885. doi: 10.1109/CVPR.2005.272.
- Lovas, T. & Barsi, Á. (2015) 'Pedestrian detection by profile laser scanning', in Domokos, E.-K., Dénes, V., and János, T. (eds) *4th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. Budapest: BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, pp. 408–412. doi: 10.1109/MTITS.2015.7223287.
- Lovas, T., Barsi, A., Detrekői, A., Dunai, L., Csak, Z., Polgár, A., Berenyi, A., Kibedy, Z. & Szocs, K. (2008) 'Terrestrial laserscanning in deformation measurements of structures', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*
- Lovas, T., Barsi, A., Szocs, K. & Kibedy, Z. (2005) 'Reconstruction of laserscanned vehicles', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXVI, No. I/W3, pp. 8–12
- Lovas, T., Barsi, A. & Toth, C. K. (2004) 'Detecting moving targets in laser scanning', in, pp. 1–7
- Lovas, T., Kertész, I., Fi, I. & Barsi, A. (2007) 'New concept of profile based pavement measurement system', in *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS Annual Conference 2007: Identifying Geospatial Solutions*
- Lovas, T., Kertész, I., Fi, I. & Barsi, A. (2008) 'Photogrammetric pavement detection system', in *Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories*
- Lovas, T., Toth, C.K. & Barsi, A. (2004) 'Model-based vehicle detection from lidar data', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*
- Lovas, T., Toth, C K & Barsi, A. (2004) 'Model-based vehicle detection from Lidar data', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (2002-)*, Vol. XXXV, No. 2, pp. 134–137
- Lovas, Tamás (2004) *Térinformatikai módszerek és a lézeres távérzékelési technológia közlekedési célú felhasználásának vizsgálata*, PhD értekezés
- Lovas, Tamás, Barsi, Árpád, Polgár, Attila, Kibedy, Zoltán & Detrekői, Ákos (2007) 'A dunaújvárosi Pentele híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRAFIA*, Vol. LIX, No. 10–11, pp. 32–39



- Lovas, Tamás, Berényi, Attila & Barsi, Árpád (2009) 'A Szabadság híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel', pp. 1–6
- Lovas, Tamás, Berényi, Attila, Barsi, Árpád & Dunai, László (2009) 'A Megyeri híd terhelésvizsgálatának támogatása földi lézerszkenneléssel', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRÁFLA*, Vol. LXI, No. 1, pp. 20–26
- Lovas, Tamás, Takács, Bence & Barsi, Árpád (2003) 'Analyzing the urban canyon effect in Budapest', in *GNSS The European Navigation Conference*, pp. 1–10
- Lublóy, Éva, Ambrus, Dávid, Kapitány, Kristóf & Barsi, Árpád (2015) 'Air Void Distribution of Asphalts Determined by Computed Tomography', *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Vol. 59, No. 4, pp. 503–510. doi: 10.3311/PPci.7608.
- Lublóy, Éva, Földes, Tamás, Ambrus, Dávid, Kapitány, Kristóf & Barsi, Árpád (2014) 'Útpályaszerkezetből vett fűrt magminták szemrevételezése és értékelése CT-vel', *ÉPÍTŐANYAG*, Vol. 66, No. 3, pp. 64–67. Available at: [http://epa.oszk.hu/02200/02231/00035/pdf/EPA02231\\_epitoanyag\\_2014\\_3\\_64-67.pdf](http://epa.oszk.hu/02200/02231/00035/pdf/EPA02231_epitoanyag_2014_3_64-67.pdf).
- Maguire, D. J. (1991) *Geographic Information Systems*. Longman. Available at: <http://lidecc.cs.uns.edu.ar/~nbb/ccm/downloads/Literatura/OVERVIEW AND DEFINITION OF GIS.pdf> (Accessed: 27 August 2017).
- Magyar Közút (2018) *Az állami közúthálózat fő jellemzői*. Available at: <http://internet.kozut.hu/Lapok/az-allami-kozuthalozat-fo-jellemzoi.aspx> (Accessed: 12 August 2018).
- Marosi, Gergely (1999) *Közlekedésbiztonsági adatbázis kialakítása térinformatikai eszközökkel*
- Mayer, Helmut (1998) *Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern*. DGK
- McGlone, J. Chris., Mikhail, Edward M. & Bethel, James S. (2004) *Manual of photogrammetry*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Available at: <https://www.amazon.com/Manual-Photogrammetry-Fifth-Chris-McGlone/dp/1570830711> (Accessed: 1 September 2017).
- McKeown, D. M., Denlinger, J. L. L., McKeown Jr., D. M. & Denlinger, J. L. L. (1988) 'Cooperative methods for road tracking in aerial imagery', *Computer Vision and Pattern Recognition, 1988. Proceedings CVPR '88., Computer Society Conference on*. IEEE Comput. Soc. Press, pp. 662–672. doi: 10.1109/CVPR.1988.196307.
- Mélykúti, Gábor (2005) *Topográfia*. Budapest: FVM Képzési Szaktanácsadási Intézet
- Molnar, B., Lovas, T., Barsi, A. & Somogyi, A. (2015) 'MOBILE MAPPING SYSTEM FOR STREETLAMP DETECTION', in *9th International Symposium on Mobile Mapping Technology*. Melbourne
- MordorIntelligence (2017) *Global Navigation System Market, web page*. Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-navigation-system-market-industry>.
- MVTec Software GmbH (2018) *HALCON – The power of machine vision*. Available at: <http://www.mvtec.com/products/halcon/> (Accessed: 1 September 2017).
- NASA (2018) *Shuttle Radar Topography Mission*. Available at: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (Accessed: 5 September 2018).
- Neuberger, Hajnalka, Barsi, Árpád & Juhász, Attila (2015) 'Lidar alapú felszínborítottság-vizsgálat', *GEODÉZIA ÉS KARTOGRÁFLA*, Vol. 67, No. 9–10, pp. 15–19
- Potó, V., Csepinszky, A. & Barsi, Á. (2018) 'Representing road related laserscanned data in curved regular grid: A support to autonomous vehicles', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-917-2018.
- Potó, Vivien & Barsi, Árpád (2017a) 'Applying Structure-from-Motion technique for visual odometry', in *AIS 2017 - 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas*, pp. 145–149
- Potó, Vivien & Barsi, Árpád (2017b) 'Önvezető járművek helymeghatározása 3D városmodell segítségével', in Balázs, B. (ed.) *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VIII*. Debrecen: DE/TTK/Földt./Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék, pp. 301–307
- Potó, Vivien, Somogyi, József Árpád, Lovas, Tamás & Barsi, Árpád (2017) 'Laser scanned point clouds to support autonomous vehicles', *Transportation Research Procedia*, Vol. 27, pp. 531–537. doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.130.
- Priyadharshini, K., Vishnupriya, S. & Saranya, P. (2013) 'Automatic Vehicle detection and tracking in aerial surveillance using DBN and Graph cut model', in *International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology*, pp. 152–157

- Rakusz, Á., Lovas, T. & Barsi, Á. (2004) 'Lidar-based vehicle segmentation', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING* (2002-), Vol. XXXV, No. 2, pp. 156–159.
- Rufli, M., Scaramuzza, D. & Siegwart, R. (2008) 'Automatic detection of checkerboards on blurred and distorted images', in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, pp. 3121–3126. doi: 10.1109/IROS.2008.4650703.
- Ruskone, R., Guigues, L., Airault, S. & Jamet, O. (1996) 'Vehicle detection on aerial images: a structural approach', in *Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*. IEEE, pp. 900–904 vol.3. doi: 10.1109/ICPR.1996.547298.
- Ruskone, Renaud, Airault, Sylvain & Jamet, Olivier (1994) 'Road network interpretation: a topological hypothesis-driven system', in Ebner, H., Heipke, C., and Eder, K. (eds). *International Society for Optics and Photonics*, pp. 711–717. doi: 10.1117/12.182879.
- Russell, Stuart Jonathan & Norvig, Peter (2005) *Mesterséges intelligencia modern megközelítésben*. Panem. Available at: [https://bookline.hu/product/home.action?\\_v=S\\_Russell\\_P\\_Norvig\\_Mesterseges\\_intel&pid=22%3A36385](https://bookline.hu/product/home.action?_v=S_Russell_P_Norvig_Mesterseges_intel&pid=22%3A36385) (Accessed: 27 August 2017).
- Sabzmejdani, Payam & Mori, Greg (2007) 'Detecting Pedestrians by Learning Shapelet Features', in *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, pp. 1–8. doi: 10.1109/CVPR.2007.383134.
- Safespot Consortium (2010) *Safespot, web page*. Available at: <http://www.safespot-eu.org/deliverables.html> (Accessed: 1 September 2017).
- Satellite Imaging Corp (2017) *QuickBird Satellite Sensor, web page*. Available at: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/quickbird/> (Accessed: 1 September 2017).
- Shao, Xiaowei, Zhao, Huijing, Nakamura, Katsuyuki, Katabira, Kyoichiro, Shibasaki, Ryosuke & Nakagawa, Yuri (2007) 'Detection and tracking of multiple pedestrians by using laser range scanners', in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, pp. 2174–2179. doi: 10.1109/IROS.2007.4399152.
- Somogyi, A., Barsi, A., Molnar, B. & Lovas, T. (2016) 'CROWDSOURCING BASED 3D MODELING', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLI-B5, pp. 587–590. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-587-2016.
- Somogyi, A., Lovas, T. & Barsi, A. (2017) 'Comparison of spatial reconstruction software packages using DSLR images', *Pollack Periodica*, Vol. 12, No. 2. doi: 10.1556/606.2017.12.2.2.
- Somogyi, Árpád & Barsi, Árpád (2016) 'Pixel-based 3D Object Reconstruction', in *11th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (AIS 2016)*. Budapest: Óbudai Egyetem, pp. 60–63.
- Stauffer, Chris & Grimson, W. E. L. E. L. (1999) 'Adaptive background mixture models for real-time tracking', *Proceedings 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Cat No PR00149*. IEEE Comput. Soc., Vol. 2, No. c, pp. 246–252. doi: 10.1109/CVPR.1999.784637.
- Steger, Carsten (1998) 'An unbiased detector of curvilinear structures', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 20, No. 2, pp. 113–125. doi: 10.1109/34.659930.
- Steger, Carsten, Glock, Clemens, Eckstein, Wolfgang, Mayer, Helmut & Radig, Bernd (1995) 'Model-Based Road Extraction from Images', in *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*. Basel: Birkhäuser Basel, pp. 275–284. doi: 10.1007/978-3-0348-9242-1\_26.
- Storn, Rainer & Price, Kenneth (1997) 'Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces', *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, pp. 341–359. Available at: [http://jaguar.biologie.hu-berlin.de/~wolfram/pages/seminar\\_theoretische\\_biologie\\_2007/literatur/schaber/Storn1997JGlobOpt11.pdf](http://jaguar.biologie.hu-berlin.de/~wolfram/pages/seminar_theoretische_biologie_2007/literatur/schaber/Storn1997JGlobOpt11.pdf) (Accessed: 27 August 2017).
- Sullivan, G. D., Worrall, A. .. & Ferryman, J. M. (1995) 'Visual Object Recognition Using Deformable Models of Vehicles'. Available at: <http://centaur.reading.ac.uk/210/> (Accessed: 23 September 2018).
- Szele, Andras, Barsi, Arpad & Kisgyorgy, Lajos (2016) 'Analysis of Headway Characteristics in Dissipating Queues', in *Proceedings of the International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA*. Zagreb, pp. 115–120. Available at: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1460531> (Accessed: 1 September 2017).

- Tao Zhao & Nevatia, R. (2001) 'Car detection in low resolution aerial image', in *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*. IEEE Comput. Soc, pp. 710–717. doi: 10.1109/ICCV.2001.937593.
- Timár, A. & Rozgonyi, I. (2007) *Közlekedéstervezés I.: Utak tervezése, építése és fenntartása*. HEFOP jegy. Pécs: Pécsi Tudományegyetem
- Toth, C. (1995) 'Experiences with a fully digital image acquisition system', in *Proc ASPRS-ACSM annual convention, Vol. 2*, pp. 18–24
- Toth, Charles K., Barsi, Arpad & Lovas, Tamas (2003) 'Vehicle Recognition from LiDAR Data', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING* (2002-), Vol. XXXIV, No. 3/W13, pp. 162–166
- Tóth, Csaba (2017a) *Közlekedési létesítmények pályaszerkezetei*, BME jegyzet
- Tóth, Csaba (2017b) *Útpályaszerkezetek építése, üzemeltetése és fenntartása*, BME jegyzet
- Tóth, Z. & Barsi, A. (2005) 'Analyzing Road Junctions By Geometric Transformations', *Proceedings of the ISPRS Workshop, Commission III Working Group, vol. 5.*, Vol. XXXVI, No. I/W3, pp. 1–4
- Tóth, Z., Lovas, T., Mélykúti, G. & Barsi, Á. (2004) 'Image-Based Driver's Guidance System', *INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING* (2002-), Vol. XXXV, No. B4, pp. 388–390. Available at: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/377.pdf>.
- Tóth, Zoltán (2009) *Az automatizáció lehetőségei a térinformatikai célú fotogrammetriai kiértékeléseknél*. BME
- Tóth, Zoltán, Mélykúti, Gábor & Barsi, Árpád (2005) 'Digitális videokamera kalibrációja', *GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK*, Vol. 8, p. 297
- Trinder, John C., Wang, Yandong, Sowmya, Arcot & Palhang, Maziar (1997) 'Artificial Intelligence in 3-D Feature Extraction', in *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*. Basel: Birkhäuser Basel, pp. 257–266. doi: 10.1007/978-3-0348-8906-3\_25.
- Vires (2018) *OpenCRG*. Available at: <http://www.opencrg.org/> (Accessed: 27 August 2018).
- Vosselman, George & de Knecht, Jurrien (1995) 'Road tracing by profile matching and Kalman filtering', in *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*. Basel: Birkhäuser Basel, pp. 265–274. doi: 10.1007/978-3-0348-9242-1\_25.
- Walk, Stefan, Majer, Nikodem, Schindler, Konrad & Schiele, Bernt (2010) 'New features and insights for pedestrian detection', in *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, pp. 1030–1037. doi: 10.1109/CVPR.2010.5540102.
- Wang, Jinhua, Lindenbergh, Roderik & Menenti, Massimo (2015) 'EVALUATING VOXEL ENABLED SCALABLE INTERSECTION OF LARGE POINT CLOUDS', *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. II-3/W5, pp. 25–31. doi: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-25-2015.
- Warshall, Stephen & Stephen (1962) 'A Theorem on Boolean Matrices', *Journal of the ACM*. ACM, Vol. 9, No. 1, pp. 11–12. doi: 10.1145/321105.321107.
- Wiedemann, Christian & Ebner, Heinrich (2000) 'AUTOMATIC COMPLETION AND EVALUATION OF ROAD NETWORKS', *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, No. B3. Available at: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part3/979\\_XXXIII-part3.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part3/979_XXXIII-part3.pdf) (Accessed: 27 August 2017).
- Xiao, Wen, Vallet, Bruno, Schindler, Konrad & Paparoditis, Nicolas (2016) 'Street-side vehicle detection, classification and change detection using mobile laser scanning data', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier, Vol. 114, pp. 166–178. doi: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.02.007.
- Zerubia, J. & Merlet, N. (1993) *Classical Mechanics and Roads Detection in SPOT Images*. Sophia Antipolis
- Zhang, C., Baltsavias, E. & Gruen, A. (2001) 'Updating of cartographic road databases by image analysis', in Baltsavias, E. P. (Emmanuel P. ., Gruen, A. (Armin), and Van Gool, L. (eds) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III)*. A.A. Balkema, p. 415. Available at: [https://books.google.hu/books?hl=en&lr=&id=kjI4k58eOl4C&oi=fnd&pg=PA243&dq=info:W1MgvWL3CYk: scholar.google.com&ots=QPWgAp32FL&sig=Gkho8M0ZpQ9EH88GdaFP\\_D\\_HHkS&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.hu/books?hl=en&lr=&id=kjI4k58eOl4C&oi=fnd&pg=PA243&dq=info:W1MgvWL3CYk: scholar.google.com&ots=QPWgAp32FL&sig=Gkho8M0ZpQ9EH88GdaFP_D_HHkS&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (Accessed: 27 August 2017).